

**REMISE EN PRODUCTION DES MILIEUX OUVERTS SUR STATIONS SÈCHES
DANS LA PESSIÈRE À MOUSSES
DU SAGUENAY-LAC-SAINT-JEAN ET DU NORD DU QUÉBEC :
RÉSULTATS 10 ANS APRÈS PLANTATION
POUR L'ÉPINETTE NOIRE**

Par :
DENIS WALSH, PASCAL TREMBLAY,
FRANÇOIS HÉBERT, JACQUES ALLAIRE, DAMIEN CÔTÉ
&
DANIEL LORD



Consortium de
recherche sur la
forêt boréale commerciale

Avril 2012

UQAC
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
À CHICOUTIMI

Ce document est disponible en format PDF à l'adresse suivante : [http : //dsf.uqac.ca/boreale/](http://dsf.uqac.ca/boreale/)
© Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale, 2012.

Le contenu de ce document peut être reproduit en autant que la source soit mentionnée.

Correspondance

Université du Québec à Chicoutimi
Partenaire du Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale
Département des Sciences fondamentales
a/s Daniel Lord
555, boul. de l'Université
Chicoutimi, Québec, G7H 2B1
Tél. : 418-545-5011, poste 5064; Télécopieur : 418-545-5012
Courrier électronique : Daniel_Lord@uqac.ca

**REMISE EN PRODUCTION DES MILIEUX OUVERTS SUR STATIONS SÈCHES
DANS LA PESSIÈRE À MOUSSES
DU SAGUENAY-LAC-SAINT-JEAN ET DU NORD DU QUÉBEC :
RÉSULTATS 10 ANS APRÈS PLANTATION
POUR L'ÉPINETTE NOIRE**

Par :
DENIS WALSH¹, M. Sc, PASCAL TREMBLAY¹, M. Sc.,
FRANÇOIS HÉBERT², Ph. D., JACQUES ALLAIRE¹, Agr., DAMIEN CÔTÉ³, M. Sc.
&
DANIEL LORD¹, Ph. D.

¹: Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale, UQAC.

²: MRNF, Direction de la recherche forestière.

³: MRNF, région 02.

Avril 2012

REMERCIEMENTS

Nous remercions les intervenants du MRNF secteur forêt soient : Gervais Rhéault (UG 26), Ghyslain Groleau (UG 27), Martin Parent (UG 22), et Claude Dussault du MRNF (secteur faune); les partenaires industriels qui ont aidé à l'implantation des dispositifs, et plus spécifiquement certaines personnes à l'emploi de ces partenaires à ce moment, soient : Éric Rousseau (COOP forestière de Laterrière), Luc Bolduc et Daniel Pelletier (COOP forestière de Girardville), Alain Réhaume (COOP forestière de Chapais-Chibougamau), Alain Tremblay (COOP forestière de Petit-Paris), Michel Belleau (Abitibi-Consolidated), Jean-François Côté (Bowater), Chantiers Chibougamau Ltée, Barette-Chapais Ltée et Pierre Mathieu à titre de forestier conseil. Finalement, nous tenons à remercier Daniel Gagnon, technicien horticole de l'UQAC pour la production des plants de cette expérience, Benoit Allaire, technicien à l'UQAC qui a participé au dernier échantillonnage et tous les étudiants de premier et deuxième cycle ayant contribué à la réalisation de ce projet.

RÉSUMÉ

Au sein du domaine bioclimatique de la pessière noire à mousses et de la sapinière à bouleau blanc de la forêt boréale commerciale du Québec, on retrouve des formations ouvertes d'étendue variable où la composition végétale se compare à celle rencontrée dans le domaine bioclimatique de la pessière à lichens. Ces milieux ouverts sur stations sèches, souvent appelés dénudés secs (DS), sont caractérisés par un couvert arborescent inférieur à 25 % principalement composé d'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.), parfois accompagné de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.). La faible densité du couvert arborescent de ces milieux serait plus liée à l'historique des perturbations des sites qu'à une capacité de support jugée trop faible. En fait, elle proviendrait plus d'une succession de perturbations naturelles menant à un déficit de régénération. Ramener ces sites à leur densité arborescente initiale par différentes approches sylvicoles pourrait donc s'avérer intéressant.

Les objectifs du présent projet sont de tester la réponse de croissance de plants d'épinette noire en fonction de différentes préparations de terrain (taupe et scarifiage) et de deux gabarits de plants (126-25 et 67-50) en utilisant des plantations effectuées dans des pessières à mousses (PM) récoltées et scarifiées à titre de témoins.

Pour les parcelles scarifiées, les taux de survie demeurent, dans tous les cas, suffisamment élevés pour assurer le succès de la plantation. La croissance des plants après dix ans est significativement supérieure dans les parcelles établies dans les PM par rapport à celles établies dans les DS. Ces différences pourraient être liées au niveau de perturbation supérieure des parcelles scarifiées des PM, lesquelles ont été récoltées avant le scarifiage. Cette hypothèse est aussi supportée lorsque les données des différentes préparations de terrain utilisées dans les DS sont comparées entre elles. Le scarifiage a permis d'obtenir les taux de survie et de croissance (hauteur et volume de la tige, biomasse aérienne et racinaire) les plus élevés dix ans après plantation comparativement aux deux autres traitements de plus faible niveau de perturbation, soit la taupe et la plantation directe. L'ensemble de ces résultats démontrent que les DS, principalement lorsque scarifiés, présentent un potentiel de croissance intéressant qui mérite une attention particulière.

Mots-clés : plantation, épinette noire, *Picea mariana*, forêt boréale, pessière à mousses, dénudé sec, DS, scarifiage, TTS, taupe, plantation directe, plant de petites dimensions, 126-25, 67-50.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	III
RÉSUMÉ.....	V
TABLE DES MATIÈRE.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES FIGURES.....	XI
INTRODUCTION.....	1
MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	2
Dispositif expérimental.....	2
Matériel végétal.....	3
Échantillonnage	4
Analyses statistiques.....	4
RÉSULTATS.....	6
Survie.....	6
Croissance en hauteur	6
Biomasse et volume de la tige.....	9
Contenu foliaire en minéraux.....	11
DISCUSSION.....	14
Impact des modes de préparation de terrain dans les DS	14
Comparaison entre les plantations des DS scarifiés et des pessières noires à mousses récoltées scarifiées.....	16
Comparaison entre les deux gabarits de plants.....	17
PERSPECTIVES.....	18
RÉFÉRENCES.....	19

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Superficies reboisées (en hectares) en fonction des sites, des traitements de préparation de terrain et du gabarit des plants. Les blocs surlignés ont été détruits par des incendies en 2007 (Bloc 1-3) et en 2010 (Bloc 11-12).	3
Tableau 2. Caractéristiques morphologiques des deux gabarits de plants au moment de la plantation (moyenne \pm intervalle de confiance à 95%, n = 200).....	3
Tableau 3. Tableau de l'analyse de variance du modèle complet de la hauteur des plants.....	5
Tableau 4. Analyse de variance du pourcentage de survie des plants d'épinette noire durant les 10 premières années en plantation.....	6
Tableau 5. Analyse de variance de la hauteur totale des plants d'épinette noire durant les 10 premières années en plantation.....	8
Tableau 6. Analyse de variance de la croissance annuelle en hauteur des plants d'épinette noire durant les 10 premières années en plantation.....	9
Tableau 7. Analyse de variance de la biomasse des plants d'épinette noire durant les cinq premières années en plantation dans le cas de la biomasse épigée et des trois premières années dans le cas de la biomasse racinaire.....	10
Tableau 8. Analyse de variance du volume de la tige des plants d'épinette noire durant les 10 premières années en plantation.....	12
Tableau 9. Analyse de variance des concentrations foliaires en minéraux des plants d'épinette noire durant les cinq premières années en plantation.....	12

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation des six sites et des 18 blocs (numéro entre parenthèses) du dispositif.....	2
Figure 2. Exemple de la disposition des parcelles et sous-parcelles à l'intérieur d'un bloc du dispositif.....	2
Figure 3. Pourcentage de survie des plants d'épinette noire durant les 10 premières années en plantation. A-) Moyennes des traitements pour le gabarit 126-25. B-) Moyennes des traitements pour le gabarit 67-50. Les abréviations des traitements sont données au tableau 1. Les courbes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles dans l'analyse des contrastes polynomiaux orthogonaux (les comparaisons sont valides pour les deux graphiques combinés). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.....	7
Figure 4. Pourcentage de survie des plants d'épinette noire durant les 10 premières années en plantation. A-) Moyennes des traitements de préparation de terrain. B-) Moyennes pour les deux types de gabarit de plants. Les abréviations des traitements sont données au tableau 1. Les courbes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles dans l'analyse des contrastes polynomiaux orthogonaux (les comparaisons sont valides pour chaque graphique individuellement). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.....	7
Figure 5. Plants 67-50 d'épinette noire des quatre traitements récoltés après deux ans en plantation.....	7
Figure 6A-) Profil d'un sillon de scarifiage dans un DS. B-) Microsite de plantation réalisé à l'aide de la taupe.....	7
Figure 7. Croissance moyenne en hauteur des plants d'épinette noire durant les 10 premières années en plantation. A-) Moyennes des traitements de préparation de terrain. B-) Moyennes pour les deux types de gabarit de plants. Les courbes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles dans l'analyse des contrastes polynomiaux orthogonaux (les comparaisons sont valides pour chaque graphique individuellement). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.....	8
Figure 8. Comparaison pour chaque bloc entre la hauteur des tiges d'épinette noire à 10 ans des parcelles scarifiées des DS (ScDS) et des parcelles témoins (ScPM). Les blocs 1, 2, 3 et 11 sont manquants puisqu'ils ont été détruits par des incendies de forêt. LCI : limite de confiance inférieure; LCS : limite de confiance supérieure.....	8
Figure 9. Croissance annuelle moyenne en hauteur des plants d'épinette noire durant les 10 premières années en plantation. A-) Moyennes des traitements de préparation de terrain. B-) Moyennes pour les deux types de gabarit de plants. Les courbes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles dans l'analyse des contrastes polynomiaux orthogonaux (les comparaisons sont valides pour chaque graphique individuellement). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.....	9
Figure 10. Biomasse sèche épigée des plants d'épinette noire durant les cinq premières années en plantation. A-) Moyennes pour les plants cultivés en 126-25 B-) Moyennes pour les plants cultivés en 67-50. Les courbes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles dans l'analyse des contrastes polynomiaux orthogonaux (les comparaisons sont valides pour les deux graphiques combinés). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.....	10
Figure 11. Biomasse sèche des plants d'épinette noire. A-) Biomasse épigée B-) Biomasse racinaire. Les courbes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles dans l'analyse des contrastes polynomiaux orthogonaux (les comparaisons sont valides pour chaque graphique individuellement). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.....	11

Figure 12. Biomasse sèche épigée des plants d'épinette noire durant les cinq premières années en plantation. Moyennes pour chaque type de gabarit de plants. Les courbes sont significativement différentes dans l'analyse des contrastes polynomiaux orthogonaux. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.....	11
Figure 13. Relation entre la biomasse sèche épigée et le volume de la tige des épinettes noires; n = 3 212.....	11
Figure 14. Relation entre la hauteur et le diamètre des tiges d'épinette noire; n = 2 125.....	11
Figure 15. Volume de la tige des plants d'épinette noire durant les 10 premières années en plantation. A-) Moyennes des traitements de préparation de terrain. B-) Moyennes pour les deux types de gabarit de plants. Les courbes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles dans l'analyse des contrastes polynomiaux orthogonaux (les comparaisons sont valides pour chaque graphique individuellement). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%; n.s., non significatif à $P \leq 0,05$	12
Figure 16. Concentrations foliaires en minéraux des plants d'épinette noire durant les cinq premières années en plantation en fonction des traitements de préparation de terrain. Les courbes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles dans l'analyse des contrastes polynomiaux orthogonaux. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%; n.s., non significatif à $P \leq 0,05$	13
Figure 17. Concentrations foliaires en minéraux des plants d'épinette noire durant les cinq premières années en plantation en fonction des gabarits de plants. Les courbes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles dans l'analyse des contrastes polynomiaux orthogonaux. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%; n.s., non significatif à $P \leq 0,05$	13

INTRODUCTION

Le domaine bioclimatique de la pessière noire à mousses du Québec est dominé par les peuplements fermés d'épinette noire (Saucier et al. 2009). Au sein de ce domaine, on retrouve aussi des formations ouvertes de superficie variable où la composition végétale se compare à celle rencontrée dans les domaines de la pessière à lichens et de la toundra forestière (Morneau et Payette 1989, Riverin et Gagnon 1996). Ces milieux ouverts sur stations sèches, souvent appelés dénudés secs (DS), sont caractérisés par un couvert arborescent inférieure à 25 % et principalement composés d'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.), parfois accompagnés de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.).

Les pessières à lichens seraient en expansion depuis les années 1950 et représenteraient aujourd'hui entre 5% et 11% du territoire où se font les coupes forestières entre les latitudes 48°53' N et 50°42' N (Girard et al. (2008). Une analyse préliminaire réalisée en 2001 pour la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean-Chibougamau-Chapais (région 02 et 10), à partir des banques de données de l'inventaire forestier du troisième décennal du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, a permis d'évaluer grossièrement l'incidence de ce type de peuplement sur le territoire régional (Damien Côté, communication personnelle). Les résultats de cette analyse indiquent qu'environ 10 % ($\cong 1\,000\,000$ ha) du territoire inventorié (régions 02 et 10) se retrouvait dans une grande classe forestière non officielle identifiée comme « milieux ouverts sur stations sèches ». Sous ce grand vocable, seuls les dénudés secs, les dénudés secs à lichens et les brûlis mal régénérés ont été extraits des cartes d'inventaire pour en arriver à cette superficie.

Il est connu que la présence des milieux ouverts dans le domaine de la pessière à lichens résulte des effets combinés des feux et du climat froid (Hustich 1965, 1966, Lavoie et Sirois 1998). Dans le domaine de la pessière fermée, le processus d'ouverture des forêts serait plutôt lié à une succession de perturbations naturelles en rafale menant à un déficit de régénération. Par exemple, des feux trop

rapprochés dans le temps ou un feu suivant une épidémie d'insectes défoliateurs peuvent conduire au processus d'ouverture (Payette et al. 2000, Côté et Gagnon 2002, Côté 2003 et 2004, Girard et al. 2009, Côté et al. 2012). La présence côte à côte de secteurs de forêts ouvertes et de forêts fermées sur des sites présentant les mêmes variables permanentes du milieu (dépôts de surface, drainage, pente, orientation) et aux conditions climatiques identiques, sont autant d'éléments qui démontrent que la faible productivité de ces sites serait plus liée à l'historique des perturbations, qu'à la capacité de support du milieu. D'ailleurs, les résultats de Côté (2004) démontrent que les individus croissant dans le milieu ouvert sur station sèche affichent une croissance comparable à ceux de la forêt fermée avoisinante. Tous ces résultats concernant la construction naturelle des milieux ouverts en forêts fermées du domaine de la pessière noire à mousses laissent croire que la remise en production de ces territoires est envisageable, tant au plan conceptuel que technique.

La préparation de terrain la plus souvent utilisée en forêt boréale québécoise lors de l'établissement d'une plantation est le scarifiage (Dancause 2008). Ce type de préparation de terrain est reconnu pour améliorer, à court terme, le succès des plantations par une amélioration des fonctions hydriques et nutritives des semis (Brand 1990, Munson et al. 1993, Prévost 1996, Boucher et al. 1998, 2001). Le scarifiage est aussi reconnu pour limiter la prolifération des éricacées en créant des barrières à l'expansion des rhizomes (Titus et al. 1995, Thiffault et al. 2005). Lorsque le scarifiage est impossible, l'utilisation de la taupe pourrait devenir un traitement sylvicole approprié. Ce type de traitement vise à exposer le sol minéral dans un rayon de 15 cm (Tremblay 1996) et son impact sur la croissance des plants pourrait ressembler à celui du scarifiage, mais à plus petite échelle. Cependant, les effets spécifiques sur les plants forestiers dans les pessières à lichens sont mitigés (Hébert et al. 2006).

Le faible niveau de compétition pour la lumière dans les

milieux ouverts sur stations sèches pourrait permettre l'utilisation de plants de plus petite dimension. Des plants cultivés en récipient de 126 cavités d'un volume de 25 cm³ (126-25) ont déjà montré leur potentiel de survie et de croissance au sein de la forêt boréale commerciale dans des brûlis récents ou des pessières à mousses récoltées (Walsh et al. 2002, 2011). Le recours à ce type de plants permet des économies d'échelle lorsqu'on considère qu'ils peuvent être produits sur une plus courte période, transportés et mis en terre à des coûts unitaires inférieurs à ceux des gabarits de plants couramment utilisés en forêts boréale (67-50 ou 45-110).

Les objectifs du projet sont de mesurer la survie et la croissance de plants d'épinette noire reboisés en 2000 et 2001 dans des milieux ouverts sur des stations sèches créés naturellement au sein de forêts fermées du domaine de la pessière noire à mousses et de la sapinière à bouleau blanc. Deux facteurs sont aussi étudiés simultanément, soit l'effet de différents modes de préparation de terrain et l'utilisation de différents gabarits de plants d'épinette noire. Ce rapport présente les résultats des mesures faites tout au long des 10 années de croissance après plantation des plants reboisés dans les DS et des sites témoins de peuplements fermés d'épinette noire récoltés et scarifiés avant plantation.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Dispositif expérimental

Des plantations expérimentales ont été réalisées dans 18 blocs localisés sur six sites dans le domaine la pessière noire à mousses (15 blocs) et dans la sapinière à bouleau blanc (3 blocs; figure 1). Chacun des blocs comprenait un peuplement classé DS et un en pessière noire à mousses, coupé récemment et scarifié, situé le plus près possible du peuplement sur station sèche du même bloc; il est utilisé dès lors comme témoin.

La croissance et la survie des plants d'épinette noire ont été comparées en fonction des niveaux de préparation de

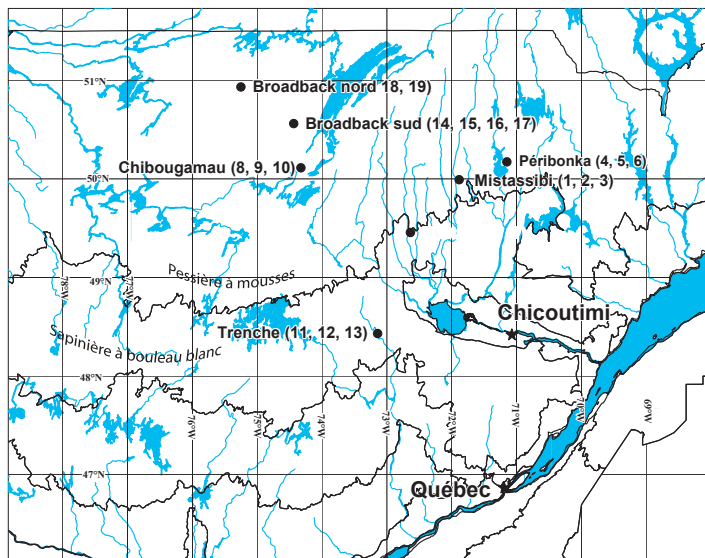


Figure 1. Localisation des six sites et des 18 blocs (numéro entre parenthèses) du dispositif.

terrain et du gabarit de plants. Ce dispositif factoriel en tiroirs subdivisés était composé en parcelle principale des préparations de terrain, à trois niveaux pour les DS¹: sans préparation de terrain (SpDS), taupé (TaDS), scarifié (ScDS) et un niveau pour la pessière noire à mousses (PM) qui était le scarifiage suivant une coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS; ScPM; figure 2). Le gabarit des plants, soit ceux de type 67-50 (67 alvéoles de 50 cm³ de substrat) et des 126-25 (126 alvéoles de 25 cm³ de substrat; IPL inc. Québec) était en sous-parcelle.

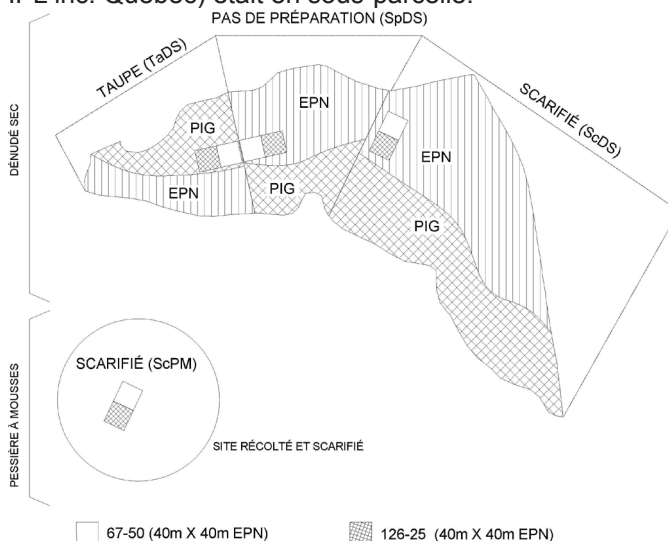


Figure 2. Exemple de la disposition des parcelles et sous-parcelles à l'intérieur d'un bloc du dispositif. Les parcelles de pin gris (PIG) ne font pas partie de ce rapport.

1 : L'expression dénudé sec (DS) fait référence aux divers type de peuplements ouverts sur stations sèches retrouvés dans les 18 blocs. Il peut donc s'agir de dénudés secs, de dénudés secs à lichens, de brûlis mal régénérés, de pinèdes ou de pessières noires de densité faible (densité D) ou de pessières noires à lichens.

Tableau 1. Superficies reboisées (en hectares) en fonction des sites, des traitements de préparation de terrain et du gabarit des plants. Les blocs surlignés ont été détruits par des incendies en 2007 (Bloc 1-3) et en 2010 (Bloc 11-12).

Site	Bloc	Coordonnées		Dénudé sec						Pessière à mousses	
		Latitude	Longitude	SpDS		TaDS		ScDS		ScPM	
		Nord	Ouest	126-25	67-50	126-25	67-50	126-25	67-50	126-25	67-50
Mistassibi	1	50,146°	71,975°	0,15	0,18	0,19	0,18	0,16	0,16	0,15	0,12
	2	49,992°	71,966°	0,16	0,16	0,15	0,16	0,14	0,15	0,07	0,05
	3	49,987°	71,978°	0,17	0,17	2,09	0,15	0,17	0,18	0,09	0,08
Péribonka	4	49,987°	71,978°	0,12	0,16	0,18	0,16	0,29	0,18	0,19	0,20
	5	50,187°	71,172°	0,14	0,16	0,14	0,15	0,27	0,26	0,18	0,21
	6	50,193°	71,193°	0,15	0,15	0,13	0,11	0,16	0,15	0,11	0,09
Chibougamau	8	49,981°	74,210°	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,19	0,17
	9	49,982°	74,201°	0,15	0,15	0,17	0,16	0,19	0,18	0,14	0,18
	10	49,987°	74,195°	0,15	0,15	0,16	0,16	0,18	0,17	0,17	0,16
Trenche	11	48,445°	73,143°	0,16	0,15	0,15	0,15	0,27	0,20	0,19	0,15
	12	48,441°	73,130°	0,15	0,15	0,14	0,16	0,14	0,18	0,16	0,18
	13	48,458°	73,077°	0,12	0,14	0,15	0,14	0,19	0,19	0,15	0,20
Broadback sud	14	50,604°	74,461°	0,14	0,15	0,18	0,13	0,13	0,08	0,32	0,17
	15	50,574°	74,408°	0,17	0,14	0,13	0,15	0,24	0,24	0,16	0,20
	16	50,574°	74,408°	0,12	0,18	0,17	0,11	0,19	0,23	0,14	0,15
Broadback nord	17	50,574°	74,408°	0,19	0,16	0,19	0,16	0,21	0,19	0,18	0,18
	18	50,934°	75,255°	0,16	0,15	0,16	0,18	0,17	0,16	0,18	0,19
	19	50,908°	75,252°	0,17	0,16	0,16	0,15	0,20	0,15	0,24	0,17

Note : SpDS : sans préparation dans dénué sec (DS). TaDS : taupé dans DS. ScDS : scarifié dans DS. ScPM : scarifié dans une pessière noire à mousse aménagée. 126-25 : gabarit de plants produits en récipient 126 cavités de 25 cm³. 67-50 : gabarit de plants produits en récipient 67 cavités de 50 cm³.

Le bloc 7 est absent pour des raisons de non-conformité.

Le scarifiage a été effectué à l'aide d'un scarificateur TTS à disques hydrauliques pour tous les sites à l'exception du site Péribonka où un scarificateur TTS à disques mécaniques a été utilisé. Suite à la préparation de terrain, la largeur des sillons variait de 60 à 80 cm. La taupe, pour sa part, est une préparation de terrain effectuée à l'aide d'une débroussailleuse modifiée qui crée un microsite de 30 cm de diamètre en enlevant la végétation de compétition et la couche de sol organique afin d'exposer le sol minéral. Les traitements de préparation de terrain ont été réalisés en 2000 pour les sites Mistassibi, Péribonka, Chibougamau et Trenche et en 2001 pour les sites Broadback sud et nord (tableau 1).

Matériel végétal

Les plants d'épinette noire utilisés dans ce dispositif ont été produits à partir des graines provenant d'un verger à graines (EPN-V8-025-K13-026-96). Les plants ont été cultivés sur l'aire de croissance du pavillon de la recherche forestière

de l'UQAC. La méthode de production est donnée plus en détail dans Walsh et al. (2011). Les caractéristiques morphologiques des deux types de plant sont données au tableau 2. Les plants d'épinette noire cultivés en 126-25 mesuraient 13 cm de hauteur tandis que ceux cultivés en 67-50 mesuraient 20 cm. Les plants des deux gabarits ont

Tableau 2. Caractéristiques morphologiques des deux gabarits de plants au moment de la plantation (moyenne ± intervalle de confiance à 95%, n = 200).

Type de récipient	126-25	67-50
Volume de l'alvéole (cc)	25	50
Semis/m ²	1658	852
Hauteur (cm)	13,4 ± 0,6	20,0 ± 0,7
Diamètre (mm)	1,24 ± 0,05	1,79 ± 0,06
Rapport H/D (cm/mm)	10,75 ± 0,24	11,35 ± 0,29
Poids de la tige (g)	0,32 ± 0,02	0,82 ± 0,04
Poids des racines (g)	0,13 ± 0,01	0,41 ± 0,04
Tige/racines (g/g)	3,06 ± 0,14	2,36 ± 0,11
[N] (g/kg)	9,79 ± 0,32	11,31 ± 0,71
[P] (g/kg)	2,28 ± 0,09	2,52 ± 0,14
[K] (g/kg)	9,91 ± 0,44	9,87 ± 0,46
[Ca] (g/kg)	6,29 ± 0,30	3,80 ± 0,14
[Mg] (g/kg)	0,88 ± 0,03	1,09 ± 0,04

reçu un traitement de jours-courts de 15 jours pour induire la dormance et favoriser leur endurcissement (Bigras et D'aoust 1992).

Échantillonnage

Pour chaque combinaison de préparation-de-terrain x gabarit, une parcelle permanente d'environ 1 600 m² a été implantée aléatoirement dans chaque site (figure 2). Une centaine de plants ont été identifiés après la plantation pour évaluer la survie. Ces plants ont été revisités 1, 2, 5 et 10 ans après la plantation et leur état, vivant (minimum de 10% de feuillage vert et turgescent) ou mort était noté. Le taux de survie a été calculé en faisant le rapport du nombre de plants survivants sur le nombre total plantés. À même les plants résiduels, 5 plants par parcelle ont été échantillonnés aléatoirement à 1, 2, 3 et 5 ans après la plantation pour mesurer la croissance. La hauteur totale (H_{tot}), la longueur de la pousse annuelle et le diamètre au collet (D_{col}) ont été mesurés en laboratoire. Les systèmes racinaires ont été séparés des parties aériennes, lesquelles ont été séchées à l'étuve à 80°C pendant 48 heures, afin d'obtenir la biomasse sèche de la partie aérienne (BS_{tige}) pour les années 1, 2, 3 et 5 ans après la plantation et des racines pour les années 1, 2 et 3 ans après la plantation. À l'échantillonnage de la 10^{ème} année après la plantation, le diamètre au sol (D_{sol}) a remplacé la mesure D_{col} et le volume de la tige (Vol_{tige}) a été calculé selon le modèle d'un paraboloïde de Forslund et Paterson (1994). Le volume pour les années antérieures a été calculé en utilisant la formule décrivant un cône (Boateng et al. 2009). Les relations entre la biomasse sèche de la tige et son volume, la hauteur et le diamètre ont été évaluées à l'aide d'une relation linéaire. Les aiguilles des pousses annuelles des 5 plants récoltés par parcelle après 1, 2 et 5 ans après la plantation ont été prélevées et combinées par parcelle. La concentration foliaire en N, P, K, Ca et Mg a été analysé par un laboratoire certifié (Direction de la recherche forestière, MRNF, Québec).

Analyses statistiques

Une analyse de variance (ANOVA) à tiroirs subdivisés a

été réalisée sur les variables de survie, de hauteur totale (H_{tot}), de la longueur de la pousse apicale (H_{PA}), du volume de la tige (Vol_{tige}), de la biomasse sèche aérienne (BS_{tige}) et racinaire (BS_{rac}) ainsi que des concentrations foliaires en N, P, K, Ca et Mg. Les 4 traitements de préparation de terrain étaient en parcelles principales, les 2 gabarits de plants en sous-parcelle et le temps en sous-sous-parcelle.

L'hétéroscédasticité a été vérifiée graphiquement en examinant la dispersion des valeurs résiduelles en fonction des valeurs prédites (Montgomery 1991). La normalité des résidus a aussi été vérifiée à l'aide du graphique des quantiles normaux et de l'histogramme de la distribution des résidus (Wilk et Gnanadesikan 1968). Des transformations logarithmiques ont été effectuées pour certaines variables afin d'homogénéiser la variance. Les données des taux de survie ont été transformées en utilisant la formule suivante : $\text{ArcSin}(\sqrt{\% \text{survie}})$ (Zar 1999). Les moyennes ajustées et leurs intervalles de confiance à $P = 95\%$ présentées dans les figures sont celles des transformations inverses après qu'une correction ait été effectuée pour minimiser le biais causé par la transformation (Baskerville 1972). Les analyses de variance ont été effectuées à l'aide de la procédure MIXED du logiciel SAS, version 9.2 (SAS Institute Inc., Cary, NC). Dans un premier temps, un modèle statistique comprenant toutes les interactions impliquant les blocs a été évalué soit :

$$Y_{ijklm} = \mu + \beta_i + \alpha_j + (\beta\alpha)_{ij} + \phi_k + (\beta\phi)_{ik} + (\alpha\phi)_{jk} + (\beta\alpha\phi)_{ijk} + \delta_l + (\beta\delta)_{il} + (\alpha\delta)_{jl} + (\beta\alpha\delta)_{ijl} + (\phi\delta)_{kl} + (\beta\phi\delta)_{ikl} + (\alpha\phi\delta)_{jkl} + (\beta\alpha\phi\delta)_{ijkl} + \varepsilon_{ijklm}$$

Y_{ijklm} = valeur observée sur le plant m , à l'année l , cultivé dans le récipient k , planté après la préparation de terrain j , dans le bloc i ,
 μ = moyenne générale,
 β_i = effet du bloc i , $i = 1, \dots, 18$ (effet aléatoire),
 α_j = effet de la préparation de terrain j , $j = \text{SpDS, TaDS, ScDS, ScPM}$ (effet fixe),
 ϕ_k = effet du gabarit de plants k , $k = 126-25, 67-50$ (effet fixe),
 $(\alpha\phi)_{jk}$ = effet de l'interaction entre la préparation de terrain j et du gabarit de plants k (effet fixe),
 δ_l = effet du temps l , $l = 0, 1, 2, 3, 5, 10$ années après la plantation¹ (effet fixe),

¹ : Ces six années d'échantillonnage sont pour la variable hauteur. Le nombre d'années d'échantillonnage peut être différent d'une variable à l'autre.

$(\alpha\delta)_{jl}$ = effet de l'interaction entre la préparation de terrain j et le temps l (effet fixe),
 $(\phi\delta)_{kl}$ = effet de l'interaction entre le gabarit de plants k et le temps l (effet fixe),
 $(\alpha\phi\delta)_{jkl}$ = effet de l'interaction entre la préparation de terrain j , le gabarit de plants k et le temps l (effet fixe),
 $(\beta\alpha)_{ij}, (\beta\phi)_{ik}, (\beta\alpha\phi)_{ijk}, (\beta\delta)_{il}, (\beta\alpha\delta)_{ijl}, (\beta\phi\delta)_{ikl}, (\beta\alpha\phi\delta)_{ijkl}$ = les interactions entre les blocs et les facteurs fixes (effets aléatoires),
 ε_{ijklm} = erreur associée au plant m de chaque parcelle expérimentale, $m = 1, \dots, 5$ (effet aléatoire).

Ce modèle a ensuite été testé à l'aide de la procédure MIXED du logiciel SAS, version 9.2. Lorsqu'une interaction impliquant l'effet bloc n'était pas significative à $P = 25\%$, cette interaction était soustraite du modèle conformément aux directives de Quinn et Keough (2002). Un exemple de modèle complet pour la variable hauteur est donné au tableau 3.

Nous avons utilisé une analyse de variance à mesures répétées (ANOVAR) pour le modèle réduit en faisant appel à l'option REPEATED de la procédure MIXED de SAS. Les degrés de liberté ont été calculés par la méthode de Kenward-Roger tel que préconisé pour les mesures répétées par Littell et al. (2006). L'effet du temps a été décomposé en ses composantes linéaire, quadratique et cubique (von Ende et Gurevitch 1993). Le modèle de variance-covariance a été choisi en fonction du critère d'Akaike (Wolfinger et Chang 1995).

Une réponse était jugée significative à un seuil de probabilité de 5%. Des contrastes orthogonaux a priori ont été utilisés pour comparer les effets des préparations de terrain et du gabarit des plants et leurs interactions avec le temps (Kirk 1982).

Tableau 3. Tableau de l'analyse de variance du modèle complet de la hauteur des plants.

Source		d.l.n.	d.l.d.	F	E(Somme des carrés moyens)
Facteurs fixes					
[1]	Préparation de terrain (P)	3	52	[1]/[9]	$\sigma^2_\varepsilon + 1,9459 \sigma^2_{\beta\alpha\delta} + 5,4128$ $\sigma^2_{\beta\alpha\phi} + 10,826 \sigma^2_{\beta\alpha} +$ $Q(\alpha, \alpha\phi, \alpha\delta, \alpha\phi\delta)$ $\sigma^2_\varepsilon + 3,6595 \sigma^2_{\beta\phi\delta} + 5,2115 \sigma^2_{\beta\alpha\phi}$ $+ 20,846 \sigma^2_{\beta\phi} + Q(\phi, \alpha\phi, \phi\delta,$ $\alpha\phi\delta)$
[2]	Gabarit (G)	1	18	[2]/[10]	
[3]	P x G	3	55	[3]/[11]	$\sigma^2_\varepsilon + 5,381 \sigma^2_{\beta\alpha\phi} + Q(\alpha\phi, \alpha\phi\delta)$ $\sigma^2_\varepsilon + 3,8322 \sigma^2_{\beta\phi\delta} + 1,9598$ $\sigma^2_{\beta\alpha\delta} + 7,6643 \sigma^2_{\beta\delta} +$ $Q(\delta, \alpha\delta, \phi\delta, \alpha\phi\delta)$
[4]	Temps (T)	5	82	[4]/[12]	
[5]	P x T	15	242	[5]/[13]	$\sigma^2_\varepsilon + 1,9667 \sigma^2_{\beta\alpha\delta} + Q(\alpha\delta, \alpha\phi\delta)$
[6]	G x T	5	85	[6]/[14]	$\sigma^2_\varepsilon + 3,7754 \sigma^2_{\beta\phi\delta} + Q(\phi\delta, \alpha\phi\delta)$
[7]	P x G x T	15	236	[7]/[15]	$\sigma^2_\varepsilon + Q(\alpha\phi\delta)$
Facteurs aléatoires					
[8]	Bloc (B)	17	47	[8]/,9945[9] +1,0095[10] -,9945[11] +,9943[12] -,9871[13] -,9938[14] +,9771[15]	$\sigma^2_\varepsilon + 3,8912 \sigma^2_{\beta\phi\delta} + 1,9779$ $\sigma^2_{\beta\alpha\delta} + 7,7823 \sigma^2_{\beta\delta} + 5,5968$ $\sigma^2_{\beta\alpha\phi} + 22,386 \sigma^2_{\beta\phi} + 11,194$ $\sigma^2_{\beta\alpha} + 44,773 \sigma^2_{\beta}$ $\sigma^2_\varepsilon + 1,9804 \sigma^2_{\beta\alpha\delta} + 5,6275$ $\sigma^2_{\beta\alpha\phi} + 11,255 \sigma^2_{\beta\alpha}$ $\sigma^2_\varepsilon + 3,8529 \sigma^2_{\beta\phi\delta} + 5,5441 \sigma^2_{\beta\alpha\phi}$ $+ 22,176 \sigma^2_{\beta\phi}$
[9]	B x P	51	96	[9]/[11] +,9964[13] - ,9964[15]	
[10]	B x G	17	49	[10]/,9852[11] +,9845[14] -,9697[15]	$\sigma^2_\varepsilon + 5,6275 \sigma^2_{\beta\alpha\phi}$ $\sigma^2_\varepsilon + 3,9136 \sigma^2_{\beta\phi\delta} + 1,9815 \sigma^2_{\beta\alpha\delta}$ $+ 7,8272 \sigma^2_{\beta\delta}$
[11]	B x P x G	51	236	[11]/[15]	$\sigma^2_\varepsilon + 1,9874 \sigma^2_{\beta\alpha\delta}$
[12]	B x T	81	126	[12]/,997[13] + [14] - ,997[15]	$\sigma^2_\varepsilon + 3,9136 \sigma^2_{\beta\phi\delta}$
[13]	B x P x T	239	236	[13]/[15]	
[14]	B x G x T	81	236	[14]/[15]	
[15]	Erreur résiduelle	236	-	-	σ^2_ε

Certaines données sont manquantes à cause des feux de forêt soit les blocs 1, 2 et 3 qui ont brûlé en 2007 et les blocs 11 et 12 qui ont brûlé en 2010.

Les relations entre la biomasse et le volume de la tige ainsi qu'entre la hauteur et le diamètre des tiges ont été étudiées à l'aide de régressions linéaires de type : $Y = b_0 + b_1 X$. Les droites de régression ont été calculées par la méthode des axes orthogonaux, cette approche étant indiquée lorsque les deux variables sont sujettes à l'erreur statistique (Sokal et Rohlf 1981). Ces calculs ont été réalisés à l'aide du logiciel JMP® 9.0.1 (SAS Institute Inc., Cary, NC)

RÉSULTATS

Survie

L'interaction triple observée pour la survie montre que le profil temporel des plants 126-25 a diminué plus rapidement que celui des plants 67-50 dans les parcelles sans préparation de terrain ($P < 0,05$; figures 3A et 3B). Après 10 ans en plantation, le % de survie des plants 126-25 était de 15% seulement comparativement à 39% pour les 67-50 lorsque les plants étaient reboisés sans préparation de terrain.

La préparation de terrain a fortement influencé le pourcentage de survie ($P < 0,0001$; tableau 4). Si le pourcentage de survie ne différait pas significativement entre les parcelles témoins (ScPM) et les parcelles des dénudés secs scarifiées (ScDS), le pourcentage de survie des plants dans les parcelles taupées (TaDS) était significativement plus bas que celui des deux premiers (Figure 4A). Les parcelles plantées sans préparation de terrain (SpDS) ont affiché le plus bas pourcentage de survie après 10 ans, soit 26% comparativement à 58% pour la taupe, 89% pour les DS scarifiées et 84% pour les témoins (Figure 4A). Le pourcentage de survie des 126-25 diminuait en fonction du temps plus rapidement que celui des 67-50, soit un écart de 9% entre les deux gabarits de plants après 10 ans (Figure 4B).

Les plants survivants dans les parcelles taupées ou plantés sans préparation de terrain étaient rachitiques, défoliés dans le bas de la tige et montraient des symptômes de carences minérales avancées (Figure 5). La figure 6 montre un sillon de scarifiage et un microsite créé par la taupe.

Croissance en hauteur

Le profil de croissance en hauteur était surtout formé d'une composante linéaire ($F = 1\,176$, $P < 0,0001$; tableau 5) même si les composantes quadratique et cubique étaient significativement différentes de 0. La croissance en hauteur a été largement influencée par la préparation de terrain et les plants des parcelles DS ont montré une croissance en hauteur significativement plus faible que celle des PM ($P < 0,0001$; figure 7A). Dans les DS, la croissance en hauteur des plants reboisés après un scarifiage au TTS était significativement plus importante que celle des plants reboisés après la taupe ou lorsque plantés directement sans préparation de terrain ($P < 0,0001$). Il n'y a pas d'évidence statistique qu'une

Tableau 4. Analyse de variance du pourcentage de survie des plants d'épinette noire durant les 10 premières années en plantation.

Source	d.l.n.	d.l.d.	F	P > F
Préparation de terrain (P)	3	52	51,39	<0,0001
Gabarit (G)	1	74	59,36	<0,0001
P x G	3	74	3,02	0,0353
Temps (T)	3	31	188,00	<0,0001
Tlinéaire (TI)	1	62	554,15	<0,0001
Tquadratique (Tq)	1	31	<0,01	0,9907
Tcubique (Tc)	1	20	1,02	0,3249
P x T	9	170	38,78	<0,0001
(ScPM vs ScDS) x TI	1	380	0,03	0,8529
(ScPM vs ScDS) x Tq	1	256	<0,01	0,9916
(ScPM vs ScDS) x Tc	1	65	1,34	0,2513
(SpDS vs TaDS) x TI	1	379	23,5	<0,0001
(SpDS vs TaDS) x Tq	1	259	13,61	0,0003
(SpDS vs TaDS) x Tc	1	65	0,23	0,6353
(ScDS vs 1/2(SpDS + TaDS)) x TI	1	376	182,02	<0,0001
(ScDS vs 1/2(SpDS + TaDS)) x Tq	1	257	2,88	0,0909
(ScDS vs 1/2(SpDS + TaDS)) x Tc	1	65	0,01	0,9049
G x T	3	207	6,35	0,0004
(126 vs 67) x TI	1	261	11,48	0,0008
(126 vs 67) x Tq	1	197	3,40	0,0667
(126 vs 67) x Tc	1	162	0,21	0,6486
P x G x T	9	210	2,24	0,0210
(ScPM vs ScDS) x TI x G	1	261	0,28	0,5952
(ScPM vs ScDS) x Tq x G	1	196	0,34	0,5622
(ScPM vs ScDS) x Tc x G	1	162	0,59	0,4433
(SpDS vs TaDS) x TI x G	1	261	0,57	0,4490
(SpDS vs TaDS) x Tq x G	1	199	0,06	0,8096
(SpDS vs TaDS) x Tc x G	1	162	1,88	0,1724
(ScDS vs 1/2(SpDS + TaDS)) x TI x G	1	261	1,62	0,2039
(ScDS vs 1/2(SpDS + TaDS)) x Tq x G	1	198	3,98	0,0474
(ScDS vs 1/2(SpDS + TaDS)) x Tc x G	1	162	0,12	0,7306

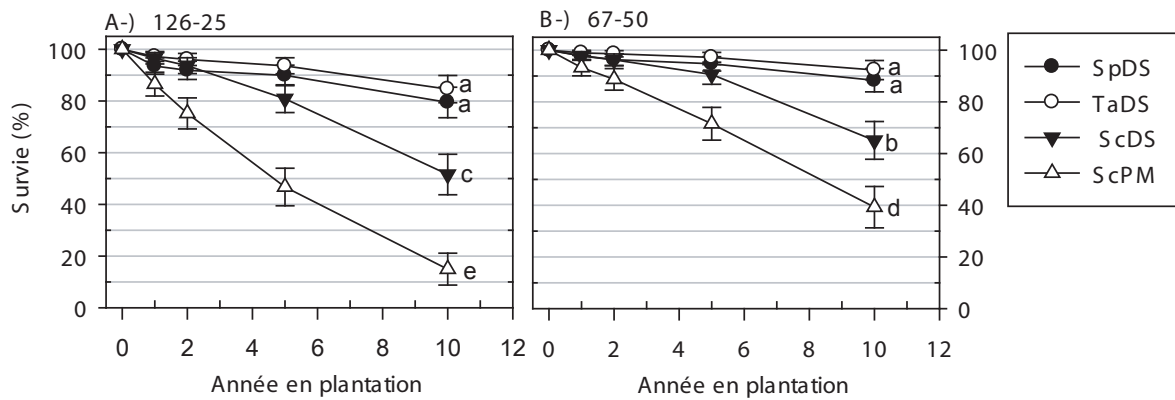


Figure 3. Pourcentage de survie des plants d'épinette noire durant les 10 premières années en plantation. A-) Moyennes des traitements pour le gabarit 126-25. B-) Moyennes des traitements pour le gabarit 67-50. Les abréviations des traitements sont données au tableau 1. Les courbes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles dans l'analyse des contrastes polynomiaux orthogonaux (les comparaisons sont valides pour les deux graphiques combinés). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.

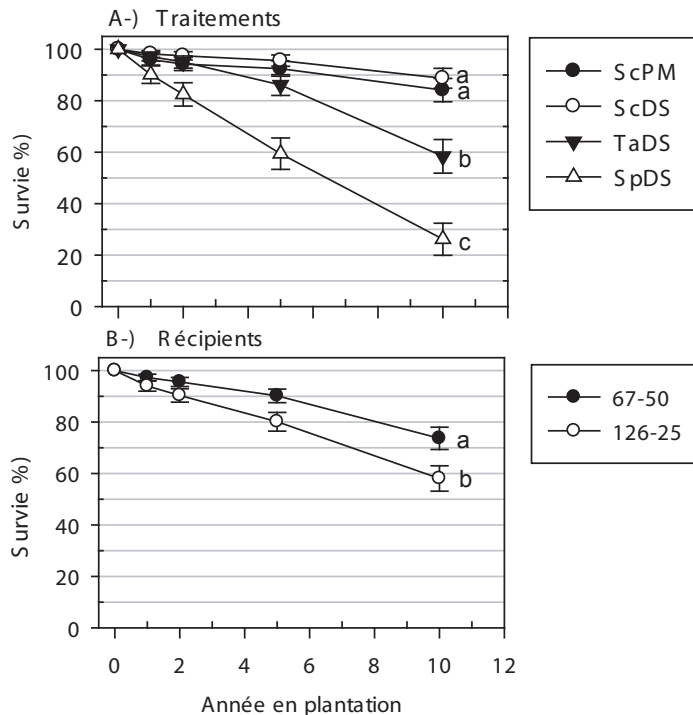


Figure 4. Pourcentage de survie des plants d'épinette noire durant les 10 premières années en plantation. A-) Moyennes des traitements de préparation de terrain. B-) Moyennes pour les deux types de gabarit de plants. Les abréviations des traitements sont données au tableau 1. Les courbes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles dans l'analyse des contrastes polynomiaux orthogonaux (les comparaisons sont valides pour chaque graphique individuellement). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.

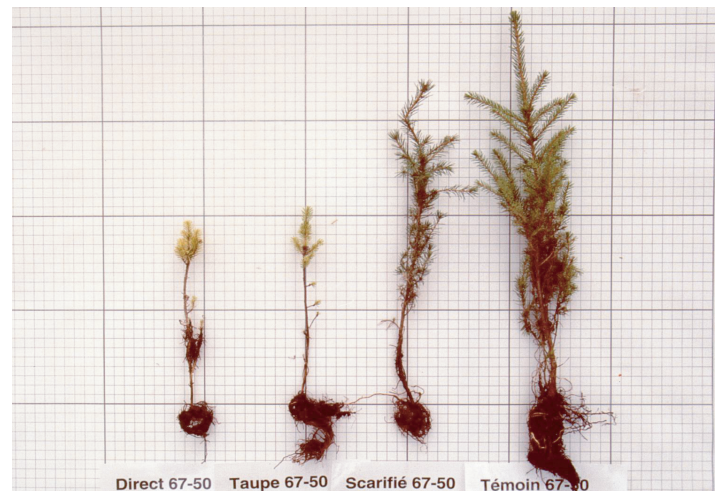


Figure 5. Plants 67-50 d'épinette noire des 4 traitements récoltés après 2 ans en plantation.

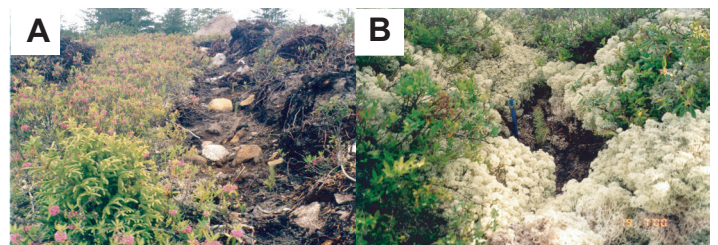


Figure 6A-) Profil d'un sillon de scarifiage dans un DS. B-) Microsite de plantation réalisé à l'aide de la taupe.

(ScPM) mesuraient 112 cm comparativement à 79 cm pour ceux des ScDS tandis que les plants reboisés après une préparation à la taupe ou plantés sans préparation de terrain mesuraient seulement 35 cm en moyenne.

préparation à la taupe améliore la croissance en hauteur par rapport à une plantation sans préparation de terrain ($P = 0,1559$). Après 10 ans en plantation, les plants témoins

L'effet du gabarit de plants a été beaucoup moins prononcé que celui de la préparation de terrain mais réel ($P < 0,0001$;

Tableau 5. Analyse de variance de la hauteur totale des plants d'épinette noire durant les 10 premières années en plantation.

Source	d.l.n.	d.l.d.	F	P > F
Préparation de terrain (P)	3	51	99,89	<0,0001
Gabarit (G)	1	18	211,86	<0,0001
P x G	3	287	9,90	<0,0001
Temps (T)	5	80	279,51	<0,0001
Tlinéaire (Tl)	1	84	1175,81	<0,0001
Tquadratique (Tq)	1	80	102,97	<0,0001
Tcubique (Tc)	1	78	19,5	<0,0001
P x T	15	240	54,84	<0,0001
(ScPM vs ScDS) x Tl	1	244	34,78	<0,0001
(ScPM vs ScDS) x Tq	1	239	3,87	0,0503
(ScPM vs ScDS) x Tc	1	236	0,36	0,549
(SpDS vs TaDS) x Tl	1	262	2,03	0,1559
(SpDS vs TaDS) x Tq	1	245	0,92	0,3386
(SpDS vs TaDS) x Tc	1	237	1,73	0,1901
(ScDS vs 1/2(SpDS + TaDS)) x Tl	1	247	320,23	<0,0001
(ScDS vs 1/2(SpDS + TaDS)) x Tq	1	240	13,37	0,0003
(ScDS vs 1/2(SpDS + TaDS)) x Tc	1	236	0,11	0,7363
G x T	5	80	16,17	<0,0001
(126 vs 67) x Tl	1	88	44,02	<0,0001
(126 vs 67) x Tq	1	80	21,62	<0,0001
(126 vs 67) x Tc	1	78	4,46	0,0379
P x G x T	15	286	1,53	0,0938

tableau 5). Après 10 ans en plantation, les plants cultivés en récipient 126-25 mesuraient 8 cm de moins que ceux cultivés en récipient 67-50 (Figure 7B). Cet écart est demeuré à peu près constant dans le temps même si l'interaction G x T est significative ($P < 0,0001$).

La figure 8 montre les écarts de hauteur entre les plants des parcelles ScDS et ceux des parcelles témoins correspondantes (ScPM). Le écart le plus important est venu du bloc «Broadback» situé le plus au nord (bloc 18). Même si en moyenne les plants des parcelles ScDS étaient significativement plus petits que ceux des ScPM, dans 28% des cas (4 blocs sur 14), la croissance en hauteur dans les

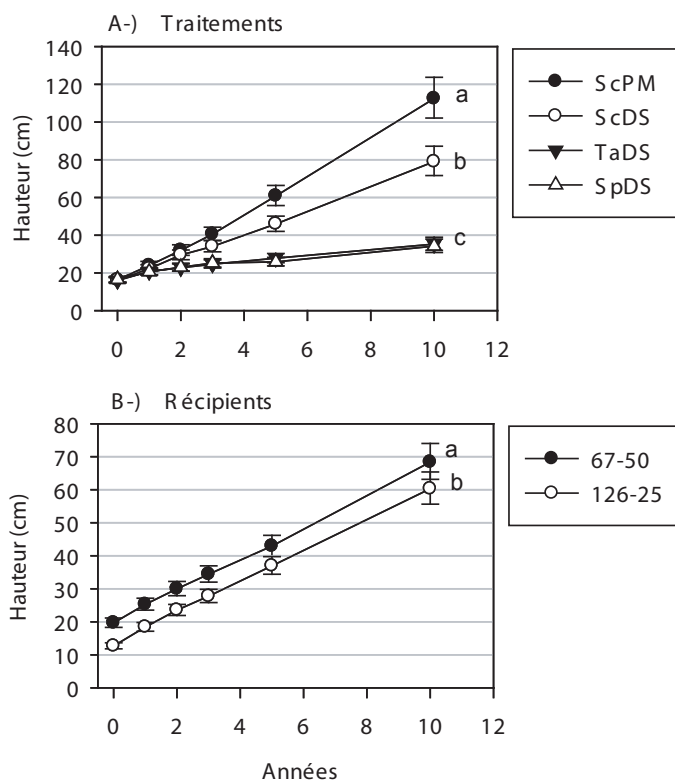


Figure 7. Croissance moyenne en hauteur des plants d'épinette noire durant les 10 premières années en plantation. A-) Moyennes des traitements de préparation de terrain. B-) Moyennes pour les deux types de gabarit de plants. Les courbes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles dans l'analyse des contrastes polynomiaux orthogonaux (les comparaisons sont valides pour chaque graphique individuellement). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.

DS était supérieure à celle des plants des PM.

On observe une interaction significative de la préparation de terrain x temps et du gabarit x temps ($P < 0,03$). La croissance de la pousse apicale des plants témoins s'est distinguée de celle des plants des parcelles ScDS par le

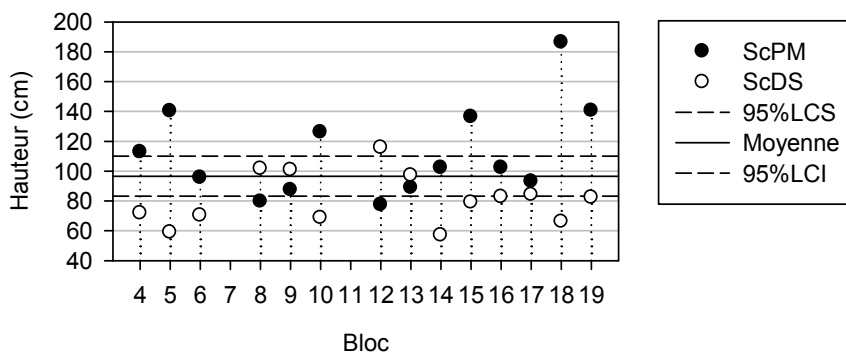


Figure 8. Comparaison pour chaque bloc entre la hauteur des tiges d'épinette noire à 10 ans des parcelles scarifiées des DS (ScDS) et des parcelles témoins (ScPM). Les blocs 1, 2, 3 et 11 sont manquants puisqu'ils ont été détruits par des incendies de forêt. LCI : limite de confiance inférieure; LCS : limite de confiance supérieure.

Tableau 6. Analyse de variance de la croissance annuelle en hauteur des plants d'épinette noire durant les 10 premières années en plantation.

Source	d.l.n.	d.l.d.	F	P > F
Préparation de terrain (P)	3	51	101,25	<0,0001
Gabarit (G)	1	81	3,53	0,0640
P x G	3	85	0,79	0,5008
Temps (T)	4	61	0,58	0,6800
P x T	12	177	13,56	<0,0001
(ScPM vs ScDS) x TI	1	214	4,66	0,0321
(ScPM vs ScDS) x Tq	1	237	2,54	0,1123
(ScPM vs ScDS) x Tc	1	179	4,02	0,0465
(SpDS vs TaDS) x TI	1	226	0,40	0,5299
(SpDS vs TaDS) x Tq	1	241	7,05	0,0085
(SpDS vs TaDS) x Tc	1	180	0,01	0,9350
(ScDS vs 1/2(SpDS + TaDS)) x TI	1	216	35,07	<0,0001
(ScDS vs 1/2(SpDS + TaDS)) x Tq	1	238	5,05	0,0256
(ScDS vs 1/2(SpDS + TaDS)) x Tc	1	180	24,92	<0,0001
G x T	4	71	2,91	0,0273
(126 vs 67) x TI	1	112	2,34	0,1293
(126 vs 67) x Tq	1	103	0,29	0,5907
(126 vs 67) x Tc	1	76	6,19	0,0150
P x G x T	12	200	0,71	0,7385

fait que la première a augmenté constamment dans le temps contrairement à cette dernière qui a plafonné après la deuxième année (Figure 9A). L'allongement de la tige était de 13 cm à la 10^{ème} année de la plantation dans les parcelles témoin et de 9 cm dans les parcelles ScDS. L'allongement de la pousse annuelle n'a pas dépassé 4 cm chez les plants des parcelles taupées ou plantées sans préparation de terrain (Figure 9A). La longueur de la pousse annuelle n'était pas significativement différente entre les plants 126-25 et 67-50 ($P = 0,0640$; tableau 6). Par contre, l'interaction G x T s'est avérée significative ($P = 0,0273$); la longueur de la pousse apicale était plus grande que celle des 67-50 la première et cinquième année en plantation et plus petite le reste du temps (Figure 9B).

Biomasse et volume de la tige

On a observé une interaction P x G x T significative pour la biomasse érigée ($P = 0,0038$; tableau 7). Dans les DS, l'écart entre les plants des parcelles scarifiées au TTS et les autres types de traitements était plus grand chez les plants 67-50 comparativement aux 126-25 ($P < 0,0001$; figures 10A et 10B). Cinq ans après la plantation, la partie érigée des plants 67-50 des parcelles ScDS pesait 37,5 g comparativement à seulement 23,8 g chez les 126-25. En fait, quelque soit le type de gabarit, les plants reboisés sur les parcelles témoins

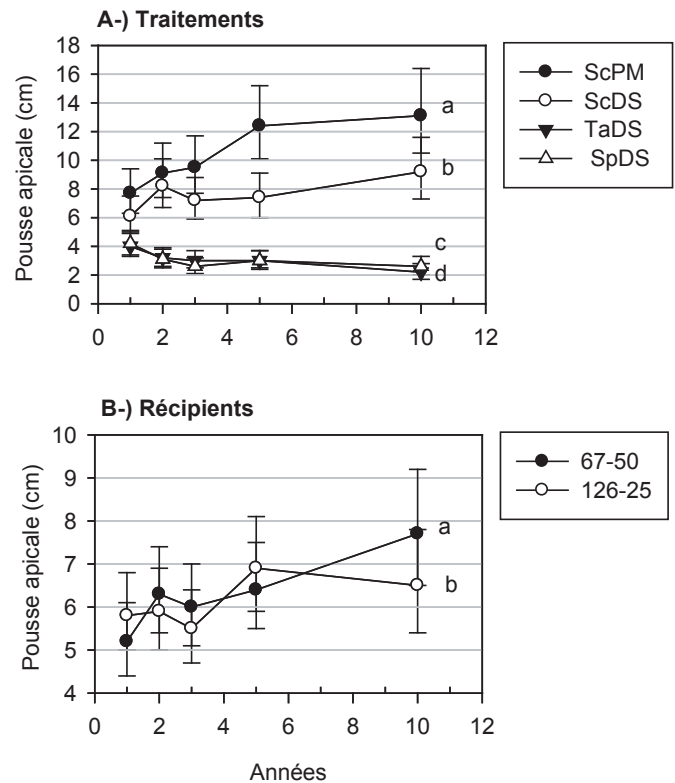


Figure 9. Croissance annuelle moyenne en hauteur des plants d'épinette noire durant les 10 premières années en plantation. A-) Moyennes des traitements de préparation de terrain. B-) Moyennes pour les deux types de gabarit de plants. Les courbes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles dans l'analyse des contrastes polynomiaux orthogonaux (les comparaisons sont valides pour chaque graphique individuellement). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.

ont atteint une biomasse significativement plus importante ($P = 0,0107$; tableau 7) que ceux reboisés dans les parcelles DS scarifiées au TTS (ScDS). La biomasse des plants des parcelles scarifiées à la taupe ou plantés sans préparation de terrain ne s'est accrue que très faiblement durant ces années pour n'atteindre que seulement 3 g après cinq ans (Figure 11A). La biomasse racinaire a évolué de la même façon; celle des plants témoins a augmenté plus rapidement que celle des plants reboisés après scarifiage au TTS des DS tandis que celles des plants reboisés sans préparation de terrain ou par la taupe n'a pas augmenté durant les trois années du suivi de croissance (Tableau 7; figure 11B). L'interaction G x T était significative ($P = 0,0028$) dans le cas de la biomasse érigée mais pas pour la biomasse racinaire (Tableau 7). L'interaction G x T pour la biomasse érigée signifie que l'écart relatif entre les 126-25 et 67-50 s'amenuisait avec le temps (Figure 12).

Tableau 7. Analyse de variance de la biomasse des plants d'épinette noire durant les 5 premières années en plantation dans le cas de la biomasse épigée et des 3 premières années dans le cas de la biomasse racinaire.

Source	Biomasse épigée				Biomasse racinaire			
	d.l.n.	d.l.d.	F	P > F	d.l.n.	d.l.d.	F	P > F
Préparation de terrain (P)	3	51	97,85	<0,0001	3	100	90,28	<0,0001
Gabarit (G)	1	17	150,96	<0,0001	1	25	136,32	<0,0001
P x G	3	52	9,84	<0,0001	3	50	6,33	0,0010
Temps (T)	3	47	266,49	<0,0001	2	35	10,36	0,0003
Tlinéaire (TI)	1	56	791,08	<0,0001	1	43	19,42	<0,0001
Tquadratique (Tq)	1	49	5,7	0,0209	1	31	0,64	0,4314
Tcubique (Tc)	1	39	0,02	0,8873	-	-	-	-
P x T	9	142	40,73	<0,0001	6	114	35,38	<0,0001
(ScPM vs ScDS) x TI	1	182	6,65	0,0107	1	115	8,57	0,0041
(ScPM vs ScDS) x Tq	1	153	1,61	0,2062	1	86	2,33	0,1303
(ScPM vs ScDS) x Tc	1	95	0,5	0,4829	-	-	-	-
(SpDS vs TaDS) x TI	1	182	0,67	0,4150	1	115	0,21	0,6445
(SpDS vs TaDS) x Tq	1	153	1,22	0,2717	1	86	0,95	0,3336
(SpDS vs TaDS) x Tc	1	95	0,08	0,7744	-	-	-	-
(ScDS vs 1/2(SpDS + TaDS)) x TI	1	182	183,47	<0,0001	1	115	99,44	<0,0001
(ScDS vs 1/2(SpDS + TaDS)) x Tq	1	153	2,14	0,1458	1	86	2,15	0,1459
(ScDS vs 1/2(SpDS + TaDS)) x Tc	1	95	3,97	0,0492	-	-	-	-
G x T	3	44	5,45	0,0028	2	79	1,04	0,3596
(126 vs 67) x TI	1	71	9,35	0,0031	-	-	-	-
(126 vs 67) x Tq	1	55	3,78	0,0570	-	-	-	-
(126 vs 67) x Tc	1	25	3,66	0,0671	-	-	-	-
P x G x T	9	160	2,86	0,0038	6	97	1,36	0,2371
(ScPM vs ScDS) x TI x G	1	158	1,85	0,1753	-	-	-	-
(ScPM vs ScDS) x Tq x G	1	176	0,00	0,9485	-	-	-	-
(ScPM vs ScDS) x Tc x G	1	84	1,61	0,2080	-	-	-	-
(SpDS vs TaDS) x TI x G	1	158	0,65	0,4208	-	-	-	-
(SpDS vs TaDS) x Tq x G	1	176	0,06	0,8089	-	-	-	-
(SpDS vs TaDS) x Tc x G	1	84	0,2	0,6566	-	-	-	-
(ScDS vs 1/2(SpDS + TaDS)) x TI x G	1	157	1,05	0,3076	-	-	-	-
(ScDS vs 1/2(SpDS + TaDS)) x Tq x G	1	176	1,58	0,2110	-	-	-	-
(ScDS vs 1/2(SpDS + TaDS)) x Tc x G	1	84	18,97	<0,0001	-	-	-	-

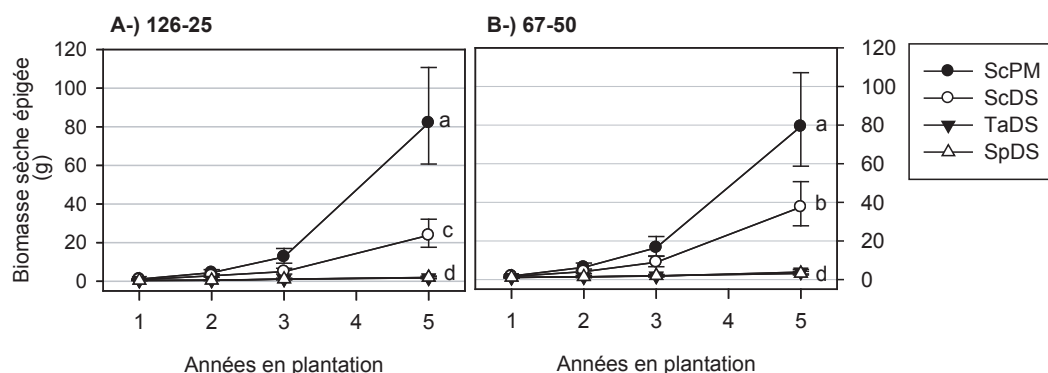


Figure 10. Biomasse sèche épigée des plants d'épinette noire durant les 5 premières années en plantation. A-) Moyennes pour les plants cultivés en 126-25 B-) Moyennes pour les plants cultivés en 67-50. Les courbes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles dans l'analyse des contrastes polynomiaux orthogonaux. Les comparaisons sont valides pour les deux graphiques combinés. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.

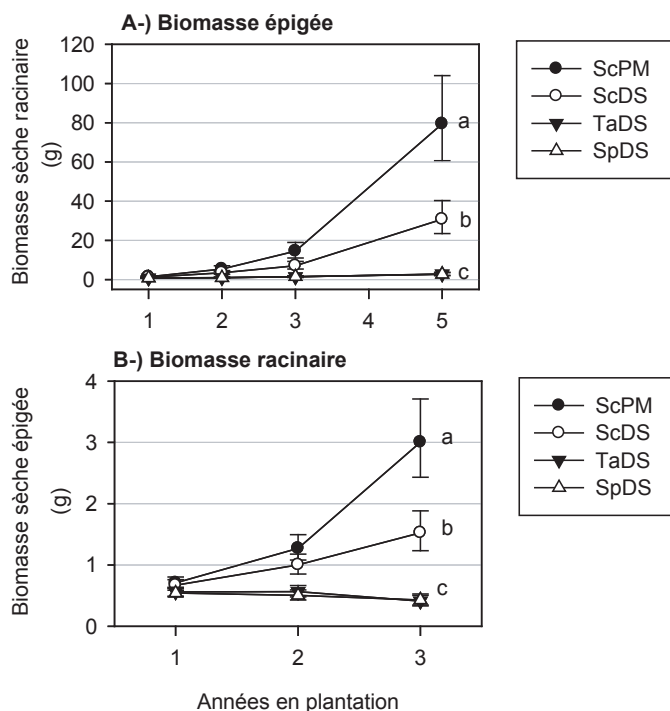


Figure 11. Biomasse sèche des plants d'épinette noire. A-) Biomasse épigée B-) Biomasse racinaire. Les courbes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles dans l'analyse des contrastes polynomiaux orthogonaux (les comparaisons sont valides pour chaque graphique individuellement). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.

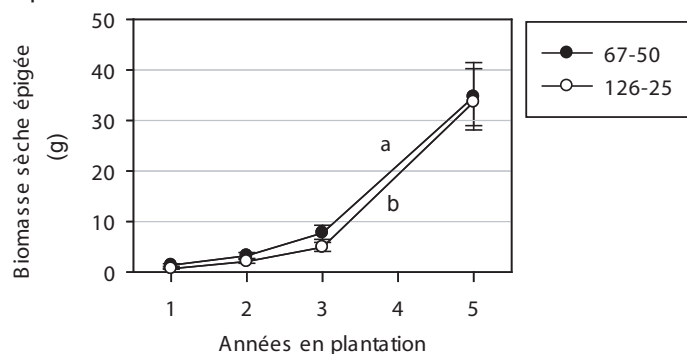


Figure 12. Biomasse sèche épigée des plants d'épinette noire durant les 5 premières années en plantation. Moyennes pour chaque type de gabarit de plants. Les courbes sont significativement différentes dans l'analyse des contrastes polynomiaux orthogonaux. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.

L'analyse statistique a montré une relation linéaire très forte ($R^2 = 0,90$) entre la biomasse sèche épigée et le volume de la tige (Figure 13). On a aussi observé une relation linéaire très forte entre la hauteur et le diamètre de la tige ($R^2 > 0,93$; Figure 14). La relation linéaire était pratiquement identique pour les plants des parcelles ScDs et des parcelles ScPM.

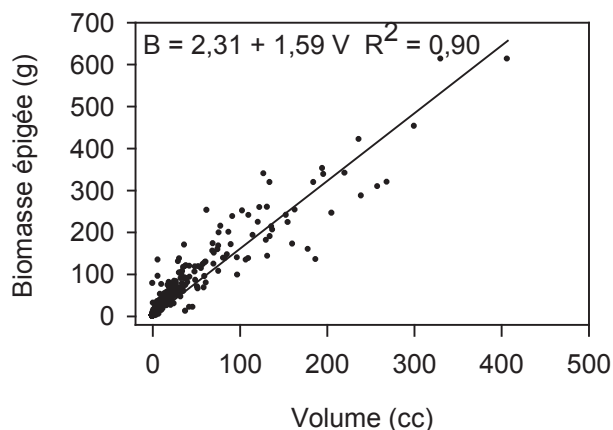


Figure 13. Relation entre la biomasse sèche épigée et le volume de la tige des épinettes noires; $n = 3\,212$.

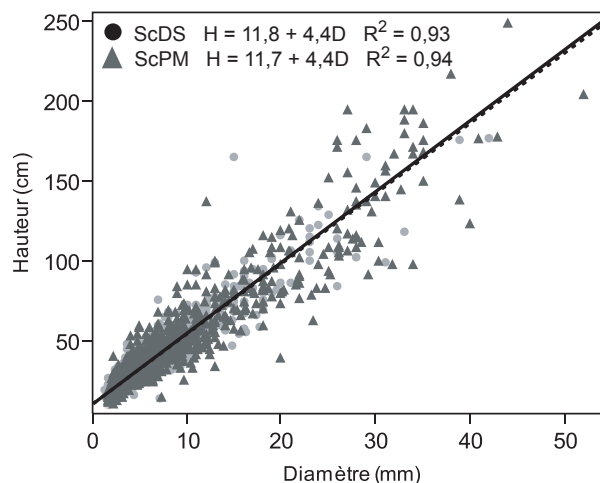


Figure 14. Relation entre la hauteur et le diamètre des tiges d'épinette noire; $n = 2\,125$.

exponentielle et les composantes temporelles T_1 et T_q étaient significatives (Tableau 8; figure 15). La croissance en volume des plants témoins a été nettement supérieure aux plants reboisés dans les DS quelque soit le type de préparation de terrain (Figure 15A). Dans les DS, le scarifiage au TTS s'est avéré nettement supérieure à la taupe ou à la plantation directe pour favoriser la croissance en volume des tiges. La croissance en volume des tiges des plants 67-50 s'est faite au même rythme pour les 126-25 et les 67-50 ($P_{G \times T} = 0,064$; figure 15B); l'écart initial à la plantation n'a fait que se perpétuer les années subséquentes. L'écart plus important entre les deux gabarits de plants la 10^{ème} année en plantation n'a pas été significatif.

Contenu foliaire en minéraux

Les concentrations foliaires en N, P, K et Ca durant les cinq premières années en plantation ont varié significativement

Le volume de la tige a augmenté d'une façon

Tableau 8. Analyse de variance du volume de la tige des plants d'épinette noire durant les 10 premières années en plantation.

Source	d.l.n.	d.l.d.	F	P > F
Préparation de terrain (P)	3	51	105,38	<0,0001
Gabarit (G)	1	20	80,81	<0,0001
P x G	3	48	2,39	0,0804
Temps (T)	4	29	466,07	<0,0001
<i>Tlinéaire (Ti)</i>	1	147	1665,86	<0,0001
<i>Tquadratique (Tq)</i>	1	56	40,20	<0,0001
<i>Tcubique (Tc)</i>	1	23	3,95	0,059
P x T	12	203	32,06	<0,0001
(ScPM vs ScDS) x <i>Ti</i>	1	236	2,08	0,1505
(ScPM vs ScDS) x <i>Tq</i>	1	411	5,93	0,0153
(ScPM vs ScDS) x <i>Tc</i>	1	186	0,05	0,8247
(SpDS vs TaDS) x <i>Ti</i>	1	247	0,46	0,498
(SpDS vs TaDS) x <i>Tq</i>	1	419	0,02	0,8842
(SpDS vs TaDS) x <i>Tc</i>	1	187	0,16	0,6898
(ScDS vs 1/2(SpDS + TaDS)) x <i>Ti</i>	1	240	102,89	<0,0001
(ScDS vs 1/2(SpDS + TaDS)) x <i>Tq</i>	1	413	48,93	<0,0001
(ScDS vs 1/2(SpDS + TaDS)) x <i>Tc</i>	1	186	0,36	0,5476
G x T	4	250	2,25	0,064
P x G x T	12	259	0,98	0,4673

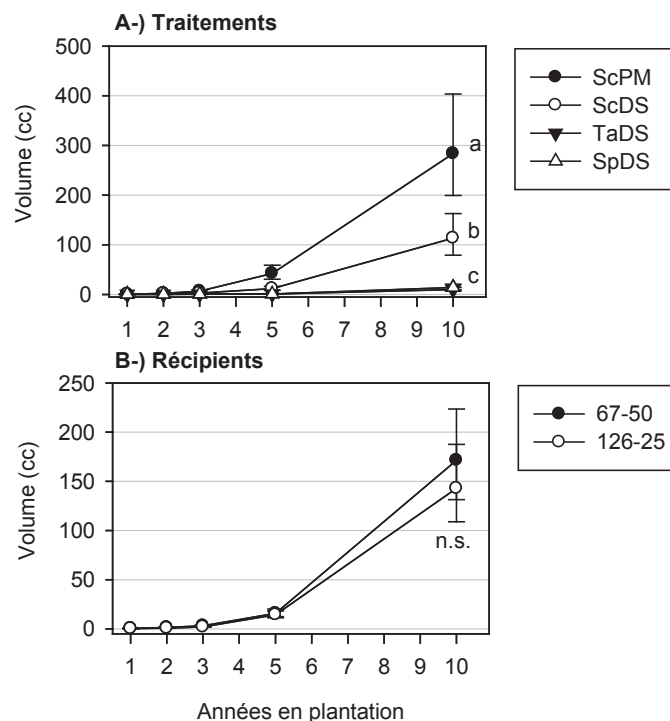


Figure 15. Volume de la tige des plants d'épinette noire durant les 10 premières années en plantation. A-) Moyennes des traitements de préparation de terrain. B-) Moyennes pour les deux types de gabarit de plants. Les courbes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles dans l'analyse des contrastes polynomiaux orthogonaux (les comparaisons sont valides pour chaque graphique individuellement). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%; n.s., non significatif à $P \leq 0,05$.

en fonction du type de préparation de terrain ($P < 0,001$; tableau 9) tandis que les différences n'ont pas été significatives pour le Mg ($P = 0,83$). L'évolution temporelle du

Tableau 9. Analyse de variance des concentrations foliaires en minéraux des plants d'épinette noire durant les 5 premières années en plantation.

Source	[N]			[P]			[K]			[Ca]			[Mg]			
	d.l.n.	d.l.d.	F	P > F	d.l.n.	F	P > F	d.l.d.	F	P > F	d.l.d.	F	P > F	d.l.d.	F	P > F
Préparation de terrain (P)	3	55	56,51	<0,0001	3	13,42	<0,0001	117	54,83	<0,0001	55	5,64	0,0019	52	0,29	0,8300
Gabarit (G)	1	45	8,60	0,0053	1	<0,01	0,9524	18	2,35	0,1420	15	46,11	<0,0001	18	2,74	0,1155
P x G	3	135	1,57	0,1991	3	0,59	0,6255	62	0,37	0,7715	140	1,07	0,3659	49	0,93	0,4356
Temps (T)	2	27	97,24	<0,0001	2	93,61	<0,0001	29	60,10	<0,0001	66	52,07	<0,0001	27	65,94	<0,0001
Tlinéaire (Ti)	1	28	164,63	<0,0001	1	167,74	<0,0001	30	96,71	<0,0001	67	69,68	<0,0001	27	128,48	<0,0001
Tquadratique (Tq)	1	27	10,70	0,0029	1	0,74	0,3958	29	10,76	0,0027	66	52,03	<0,0001	26	13,66	0,0010
P x T	6	90	26,23	<0,0001	6	9,28	<0,0001	106	7,95	<0,0001	100	4,10	0,0010	122	0,72	0,6344
(ScPM vs ScDS) x Ti	1	91	0,82	0,3683	1	1,40	0,2408	108	0,02	0,8846	104	7,58	0,0070	84	2,79	0,0986
(ScPM vs ScDS) x Tq	1	88	0,56	0,4553	1	0,44	0,5106	104	0,06	0,8053	97	0,37	0,5434	99	0,24	0,6283
(SpDS vs TaDS) x Ti	1	91	1,27	0,2634	1	1,06	0,3064	108	1,03	0,3121	104	1,03	0,3130	84	0,70	0,4042
(SpDS vs TaDS) x Tq	1	89	0,02	0,9016	1	0,18	0,6762	106	0,08	0,7831	98	1,24	0,2690	100	0,17	0,6801
(ScDS vs 1/2(SpDS +TaDS)) x Ti	1	91	111,02	<0,0001	1	43,8	<0,0001	108	30,01	<0,0001	104	1,90	0,1712	84	0,08	0,7749
(ScDS vs 1/2(SpDS +TaDS)) x Tq	1	89	0,12	0,7347	1	5,15	0,0263	105	0,45	0,5028	97	0,84	0,3603	99	0,00	0,9895
G x T	2	45	4,27	0,0200	2	1,98	0,1459	123	1,20	0,3061	40	10,24	0,0003	93	0,62	0,5416
(126 vs 67) x Ti	1	45	5,14	0,0282	1	3,14	0,0808	126	1,83	0,1788	41	16,60	0,0002	84	1,06	0,3054
(126 vs 67) x Tq	1	46	4,45	0,0404	1	<0,01	0,9679	122	0,29	0,5942	39	6,59	0,0142	100	0,08	0,7810
P x G x T	6	135	1,61	0,1493	6	0,80	0,5761	124	1,78	0,1077	140	0,23	0,9661	124	0,42	0,8646

contenu foliaire en N, P, K et Mg des plants reboisés dans les DS suite à un scarifiage au TTS ne se différencient pas des plants témoins des PM; cependant, le contenu en Ca des plants ScDS et ScPM était nettement plus faible la

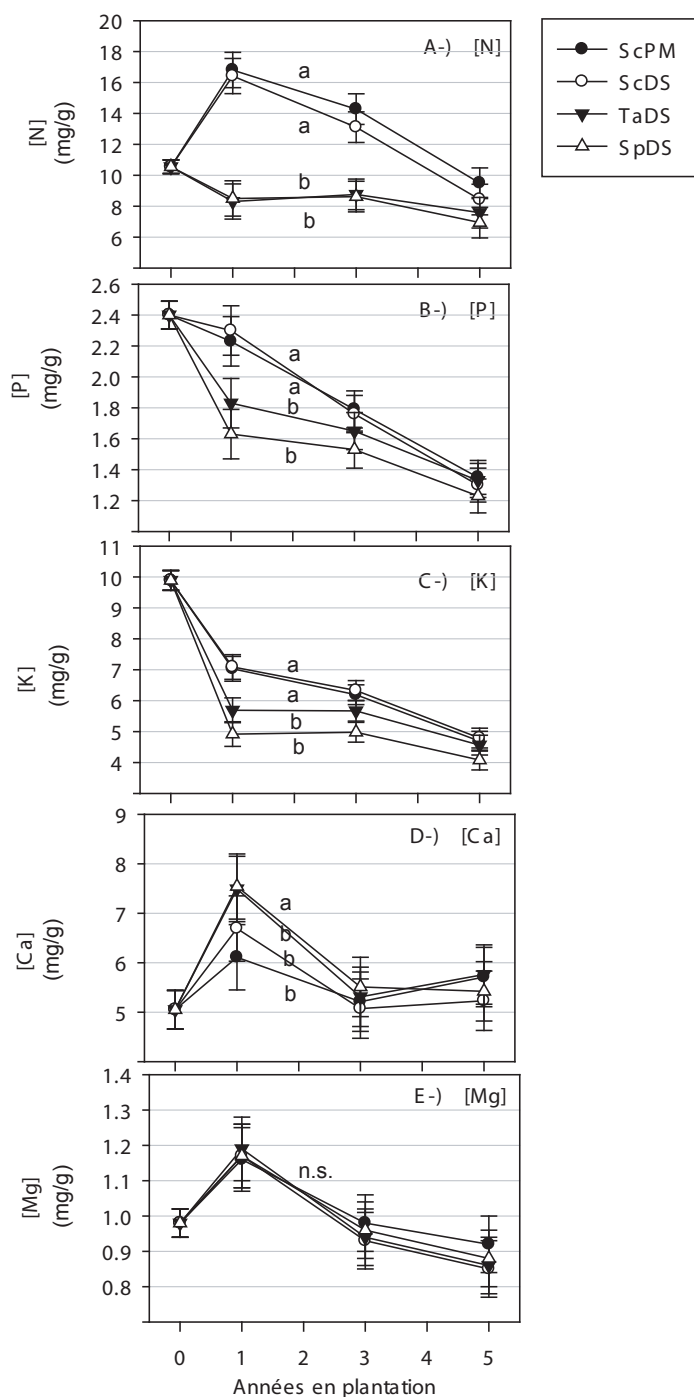


Figure 16. Concentrations foliaires en minéraux des plants d'épinette noire durant les 5 premières années en plantation en fonction des traitements de préparation de terrain. Les courbes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles dans l'analyse des contrastes polynomiaux orthogonaux. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%; n.s., non significatif à $P \leq 0,05$.

première année en plantation que celui des plants TaDS et SpDS (Figure 16). Dans les DS, les plants reboisés après un scarifiage à la taupe ou plantés sans préparation de terrain avaient un contenu foliaire significativement plus bas que ceux des parcelles scarifiées sauf dans le cas du Ca

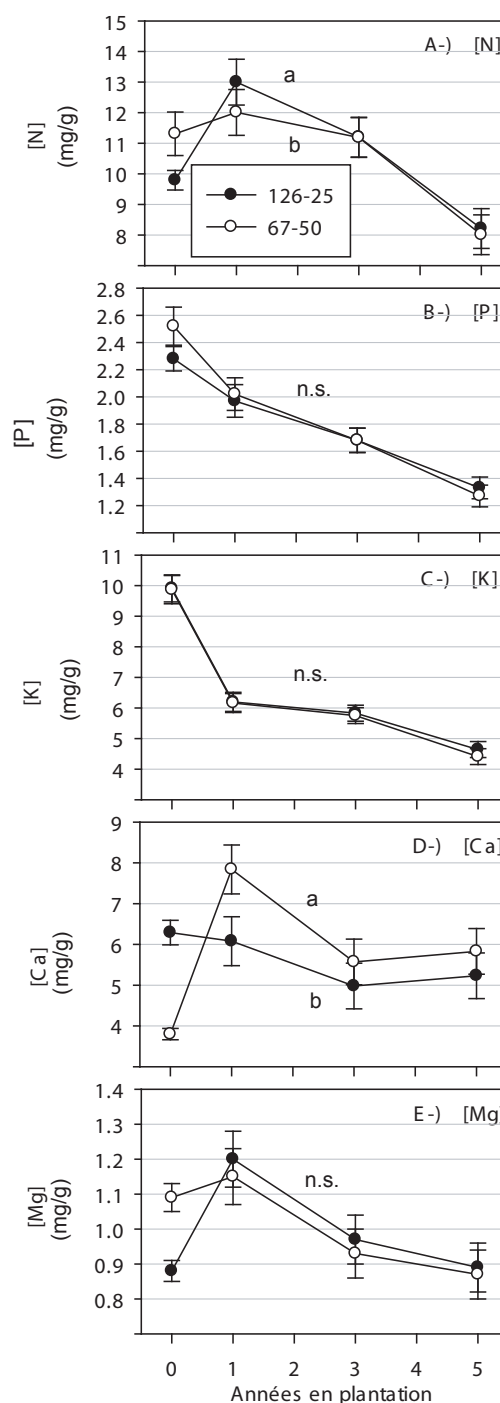


Figure 17. Concentrations foliaires en minéraux des plants d'épinette noire durant les 5 premières années en plantation en fonction des gabarits de plants. Les courbes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles dans l'analyse des contrastes polynomiaux orthogonaux. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%; n.s., non significatif à $P \leq 0,05$.

où la relation était inverse et du Mg où on ne notait pas de différences entre les 4 traitements (Figure 16A à 16E). Suite au scarifiage au TTS tant dans les DS que les PM, on a noté une augmentation importante du contenu foliaire en N, Ca et Mg une année après la plantation puis une diminution linéaire

de tous les éléments minéraux les années subséquentes. Dans le cas du Ca, la plus forte hausse a été observée chez les plants reboisés après un scarifiage à la taupe ou plantés directement sans préparation de terrain (Figure 16D).

Le contenu foliaire en N des 126-25 était significativement plus élevé que celui des 67-50 une année après la plantation même si les premiers avaient une concentration plus faible que les deuxième au moment de la plantation (Tableau 9; Figure 17A). Cette différence s'est estompée par la suite. Dans le cas du Ca, c'est l'inverse qui était vrai; la concentration en Ca était plus élevée chez les plants 126-25 au moment de la plantation puis le Ca a augmenté après un an chez les 67-50 et diminué chez les 126-25 (Figure 17D). Les concentrations en P, K et Mg n'ont pas été significativement différentes entre les plants 126-25 et 67-50 (Tableau 9; Figures 17B, 17C et 17E).

DISCUSSION

Impact des modes de préparation de terrain dans les DS

Le scarifiage est le mode de préparation de terrain qui a permis d'obtenir les meilleurs taux de survie et la plus forte croissance dans les DS 10 ans après la plantation. L'effet bénéfique du scarifiage sur la croissance et la survie des jeunes plants de conifères en phase d'établissement est donc démontré une fois de plus (voir les travaux de Bassman 1989, Grossnickle et Heikurinen 1989, Boucher et al. 1998, Örlander et al. 1998, Bedford et Sutton 2000, Thiffault et al. 2003, Hébert et al. 2006). Le scarifiage est reconnu pour augmenter la charge radiative sur le sol, ce qui stimule la croissance racinaire et l'absorption de nutriments, en plus d'améliorer les fonctions hydriques (Bassman 1989, Bowen 1991, Lyr et Garbe 1995, Boucher et al. 1998, 2001, Hébert et al. 2006). La croissance racinaire a même été négative les trois premières années en plantation dans les parcelles taupées ou plantées sans préparation de terrain. On assiste d'ailleurs à une complète stagnation de la croissance dans ces parcelles durant les 10 années de suivi du dispositif

expérimental. Le taux de survie des plants est d'ailleurs très bas. Cette mortalité ne résulte pas d'un choc de transplantation soudain mais d'un taux de mortalité élevé et constant année après année, démontrant l'incapacité de ces plants à s'acclimater au site.

La préparation de terrain à la taupe a provoqué une augmentation du taux de survie des plants comparativement aux parcelles sans préparation de terrain. Cependant, le taux de survie est trop faible pour considérer le site complètement reboisé. De plus, les variables de croissance des plants de ces deux traitements sont largement inférieures à celles mesurées sur les plants des parcelles scarifiées. L'allure rachitique (chlorose, nécrose, sénescence prématurée) des plants même après 10 ans en plantation indique qu'ils ont souffert d'un stress hydrique et nutritionnel. L'absence de développement racinaire dans le sol des plants nouvellement plantés peut conduire à des stress hydriques (Draper et al. 1985). Les semis nouvellement plantés qui ont un faible développement racinaire offrent une résistance plus élevée au mouvement de l'eau ce qui résulte en un potentiel hydrique plus bas pour un même taux de transpiration comparativement à des semis plus âgés au système racinaire mieux développé (Bernier 1993). Si le plant ne produit pas de nouvelles racines, le stress hydrique s'accroît et la mortalité survient dans la majorité des cas (Hines et Long 1986). Hébert et al. (2006) ont montré que la disponibilité en eau du sol des DS, quand ceux-ci ne sont pas scarifiés ou très peu (i.e. la taupe), est limitante pour la croissance et le statut hydrique des semis d'épinette noire; les mesures de potentiel hydrique préaube étant plus basses comparativement aux sols scarifiés des DS ou des PM.

Pourtant, d'un point de vue opérationnel, la taupe est reconnue comme un outil intéressant pour la création de microsites pour la plantation. La raison pour laquelle la taupe a été choisie est que ce type de scarifiage permet de conserver un plus grand nombre de tiges debout comparativement à une scarification mécanique. L'absence d'impact positif de la taupe, outre un taux de survie plus élevé comparativement à

la plantation directe, pourrait être reliée au plus faible niveau de perturbation du microsite comparativement au passage d'un scarificateur. En retirant la végétation compétitive dans un rayon de 15 cm, la taupe réduit l'épaisseur de la matière organique non décomposée ou partiellement décomposée. La méthode utilisée (debrousailleuse) a cependant créé une grande hétérogénéité de microsites, surtout que les sites eux-mêmes montraient une variabilité intra et inter bloc relativement grande en ce qui concerne cette épaisseur (données non présentées). À tel point qu'il arrivait que le microsite ne contienne peu ou pas d'horizon minéral en association avec de l'humus bien décomposé. Thiffault et al (2004) ont aussi noté que le bénéfice du scarifiage à la taupe dans les terrains envahis par les éricacés n'est que très modeste, les effets sur la croissance sont plus près d'une plantation directe qu'un scarifiage mécanisé. De plus, les microsites formés à l'aide de la taupe ont tendance à être recolonisés rapidement par la végétation de compétition, perdant ainsi les avantages qu'elle devait leur procurer au plan de la croissance.

Si c'est bien la fermeture rapide des microsites qui cause la plus faible croissance des plants reboisés alors le même effet aurait été théoriquement attendu à plus long terme avec le scarifiage. En effet, les sillons de scarifiage au TTS ont été aussi envahis de nouveau par la végétation de compétition sauf que selon nos observations, le délai est généralement beaucoup plus long. De plus, le rythme passablement rapide de croissance des plants mis en terre dans les parcelles scarifiées et leur densité élevée (environ 2 000 tiges à l'hectare) permet à ceux-ci de rapidement influencer la composition même de la végétation au sol, entre autres par un effet d'interception de la lumière. La densité des lichens des genres *Cladina* et *Cladonia* devrait donc diminuer puisqu'il s'agit d'organismes fortement héliophiles (Brodo et al. 2001). En résumé, les résultats démontrent clairement l'obligation de préparer le terrain de façon agressive, même si le recouvrement végétatif des milieux ouverts sur stations sèches apparaît souvent comme un manteau plutôt mince de lichens et de mousses,

transpercé par une densité variable de tiges d'éricacées. Si ils sont laissés en place due à l'utilisation d'une préparation de terrain d'intensité modérée (la taupe), ces compétiteurs diminuent nettement la survie et la croissance des épinettes noires plantées comparativement au scarifiage, lequel réduit considérablement la compétition et permet aux plants de bénéficier d'avantages toujours présents après 10 ans.

Les résultats de Girard (2004) sur une étude sur la fertilité des DS ont montré que les pessières à lichens et les pessières à mousses ne présentent pas de différences significatives des concentrations des principaux nutriments de la solution du sol. La diminution de l'influence de la compétition sur la disponibilité en nutriments, l'interférence sur la colonisation des mycorhizes et l'interférence allélopathique devraient aussi être considérées pour expliquer, au moins en partie, les impacts positifs du scarifiage (Lanini et Radosevich 1986, Mallik 1993, Zhu et Mallik 1994, Bradley et al. 1997, Yamasaki et al. 1998, 2002). D'ailleurs la fertilisation ne peut compenser l'absence de scarifiage selon Thiffault (2004); la proximité des éricacés ainsi que l'isolement thermique du sol par l'épaisse couche d'humus limitent l'apport des éléments nutritifs et empêchent les plants d'exprimer davantage leur potentiel de croissance. Nos résultats montrent un accroissement important des concentrations foliaires en N la première année sur les sites scarifiés. Prévost et Dumais (2003) ont montré que le scarifiage des PM a un effet global significatif sur la teneur en N des aiguilles de l'année courante des plants d'épinette noire jusqu'à 5 ans après la plantation mais que cette action n'était plus détectable après 10 ans. Dans notre cas, l'effet positif du scarifiage sur la nutrition des plants se limite à 3 ans puisque les teneurs en N des plants des parcelles ScDS rejoignent celles des parcelles TaDs ou SpDS après 5 ans en plantation. Ils ont aussi noté à 5 ans un léger effet positif sur les teneurs en P mais aucun sur le K; tout comme notre étude, ils notent une diminution importante des concentrations foliaire en N-P-K 10 ans après la plantation du même ordre de grandeur que dans notre expérience. Thiffault et al. (2005) ont observé aussi un effet positif du scarifiage sur la concentration foliaire en N, P,

K, aucun sur le Ca et une diminution du Mg.

La croissance maximale de l'épinette noire se situe à des concentrations foliaires en N entre 1.5-2.5%, des concentrations de P entre 0,18-0,30%, ceux de K entre 0,4-0,8%, ceux de Ca entre 0,10-0,15% et ceux de Mg entre 0,09-0,12% (Grossnickle 2000). Ainsi, les plants des parcelles taupées ou plantées directement sans préparation de terrain ont des teneurs sous-optimales en N et P durant les 5 années du suivi des analyses foliaires. Les plants des parcelles scarifiées pour leur part avaient un niveau optimum en N et P durant les 3 premières années en plantation ce qui explique probablement leur croissance plus élevée; ces valeurs sont sous-optimales après cette date. Les niveaux de Ca sont sur-optimales quelque soit le traitement de préparation de terrain ou de gabarit de plants. Des teneurs élevées en Ca peuvent occasionner des déficiences en Mg, Fe et B (Landis et al. 1989). Dans notre cas, les concentrations en Mg demeurent proche des valeurs optimales. Les éricacées en général ont des concentrations élevées en Ca; toutes les espèces poussant sur des sols acides ont la propriété d'accumuler le Ca (Ingestad 1973). D'après Ingestad (1979), les proportions en éléments minéraux pour une croissance optimale chez l'épinette est de 100 N : 50 K : 16 P : 5 Ca : 5 Mg. Malgré les fluctuations dans les concentrations des différents minéraux au cours des cinq années du suivi, leur proportion ne varie pas énormément. On obtient les proportions suivantes pour l'ensemble des parcelles; 100 N : 54 K : 16 P : 60 Ca : 10 Mg. On remarque que le Mg et surtout le Ca sont proportionnellement surreprésentés. La raison reste inconnue.

Comparaison entre les plantations des DS scarifiés et des pessière noire à mousses récoltés scarifiées

La survie des plants est comparable entre les parcelles scarifiées des deux milieux (ScDS et ScPM); le taux de survie dans les DS (91%) est même légèrement supérieur à celui des PM (87%). Ces résultats sont du même ordre de grandeur que ceux compilés par Trottier (1998) qui a fait un suivi des plantations en forêt publique de 1986 à 1995 sur

91% des superficies reboisées par le MRN au Saguenay-Lac-Saint-Jean; le taux de survie après 8 ans en plantation atteignait $90\% \pm 5\%$ pour l'épinette noire cultivée en 67-50.

Les statistiques forestières de Trottier (1998) concernant le Saguenay-Lac-Saint-Jean montrent qu'à 8 ans, les épinettes noires cultivées en 67-50 mesuraient en moyenne 102 ± 1 cm de haut (223 placettes-échantillons). Nos parcelles témoins dans la PM s'avèrent donc un échantillonnage représentatif de la forêt boréale puisqu'au même âge, les 67-50 témoins mesuraient 92 cm. Les statistiques de Trottier (1998) regroupent différents domaines bioclimatiques qui sont reconnus pour être plus fertiles comparativement au domaine de la pessière noire à mousses où sont situés la majorité de nos sites d'échantillonnage. Il est donc normal que la hauteur moyenne à 8 ans des plants présentée dans le rapport de Trottier (1998) soit très légèrement supérieure à celle des plants échantillonnés dans les parcelles ScDS. Par contre, la croissance en hauteur est inférieure de 29% dans les DS comparativement aux PM. Si on regarde bloc par bloc, on observe que dans 28% des cas, la croissance en hauteur était supérieure dans les DS comparativement aux PM. Présentement, notre banque de données ne nous permet pas d'identifier les variables ou les facteurs caractérisant les meilleurs sites pour le reboisement des dénudés secs en épinette noire.

En extrapolant les courbes de croissance en hauteur, les épinettes noires dans les parcelles ScDS devraient mesurées 1,0 m à 13 ans et ceux des parcelles ScPM 1,5 m. Ces résultats sont inférieurs à ceux publiés par Prégent et Poliquin (2006) pour l'épinette noire, soit une hauteur moyenne de 1,9 m au second mesurage à 13 ans dans la région écologique 6 est (34 parcelles) et de 2,0 m dans la région écologique 6 ouest (72 parcelles). Prégent et Poliquin (2006) prédisent un volume marchand moyen à 60 ans de $164 \text{ m}^3/\text{ha}$ dans la région 6 est et de $199 \text{ m}^3/\text{ha}$ dans la région 6 ouest. En se basant sur l'extrapolation des hauteurs à 13 ans, le rendement des plantations d'épinette noire des ScDS devrait être inférieur à ces prévisions. Par contre, nos

résultats montrent que les relations allométriques hauteur : diamètre sont les mêmes pour les plants d'épinette noire croissant dans les DS ou les PM. Ce facteur est important parce que le calcul du volume marchand est basé sur la hauteur des dominants mais aussi sur la surface terrière totale (Prégent et al. 1996). Les résultats dendrométriques de Prégent et Végiard (2000) montrent que la hauteur des dominants est d'au moins 1 m supérieure à la hauteur moyenne des peuplements âgés d'environ 15 ans. Cependant, les modèles de prévision utilisés actuellement ont été développés à partir des mesures des plantations d'épinette ne dépassant pas 30 ans et situées dans la partie méridionale du Québec. Une extrapolation au delà de 30 ans et pour des parcelles situées dans la pessière noire reste donc hasardeuse.

Ces chiffres doivent donc être interprétés avec prudence. Des études plus poussées, en échantillonnant les arbres dominants tel que préconisé par Prégent et al. (1996) permettrait de mieux prédire le rendement futur des plantations d'épinette noire dans les DS. Seule cette mesure permettrait de calculer l'indice de qualité des stations (IQS) de chacun des sites, tant DS que PM, pour chaque mode de préparation de terrain. Or, cette mesure pourra difficilement être obtenue avant la fin de la période de croissance juvénile chez l'épinette noire, soit une période de 15 à 20 ans après plantation (Lord et al. 2005). D'ici là, le suivi par la moyenne des individus échantillonnés et des dominants demeurera les meilleurs indicateurs. D'ailleurs, la biomasse épigée après 5 ans en plantation des plants des parcelles témoin est très largement supérieure à celles des ScDS. La biomasse épigée est fortement corrélée au volume de la tige et il est donc pas surprenant que le volume des plants témoins est 2,5 fois plus élevé que celui des plants des ScDS après 10 ans en plantation. Il est difficile de prédire si cet écart s'agrandira avec le temps.

Comparaison entre les deux gabarits de plants

Les taux de survie des plants cultivés en récipients 126-25 sont un peu moins élevés que ceux retrouvés pour les

plants cultivés en récipients 67-50. Les différences sont particulièrement importantes pour les parcelles sans aucune préparation de terrain dont seulement 15% des plants étaient vivants 10 ans après la plantation, contre 39% pour les plants 67-50. Dans les parcelles scarifiées, le taux de survie après dix ans des 126-25 est très élevé, soit 85%. Le succès de la plantation semble donc assuré dans toutes les parcelles scarifiées, que ce soit celles de la pessière à mousses ou celles des dénudés secs, quelque soit le gabarit utilisé.

Dans notre étude sur l'ensemble des parcelles, le taux de survie des 126-25 était légèrement plus bas que celui des 67-50 de 7-9%. Un taux de survie légèrement inférieur des 126-25 par rapport aux 67-50 a aussi été observé par Walsh et al. (2011); il faut ajouter cependant que dans ce cas, le taux de survie des mini-plants se chiffrait à 91% comparativement à 96% pour les plants conventionnels. Bref, les mini-plants cultivés en 126-25 ont montré un taux de survie très intéressant en plantation dans la forêt boréale. De plus, le type de récipient a été amélioré (113-25) et plus de 22,9 millions de plants d'épinette noire cultivés dans ce récipient ont été reboisés dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean en 2011 (Audrey Murray, MRNF, communication personnelle). D'autres expériences confirment le potentiel élevé des mini-plants en forêt boréale. Johansson et al. (2007) ont obtenu en Suède des taux de survie aussi élevés que 99% pour des mini-plants de 6 cm produits en 10 semaines à une densité de 1 000 semis/m².

La croissance en longueur de la pousse annuelle des 126-25 n'était pas significativement différente de celle des 67-50 soit 6 cm/an en moyenne durant les 10 années en plantation pour tous les traitements et +7 cm/an dans les ScDS. Les différences de hauteur totale de la tige reflètent la différence de hauteur initiale des plants au moment de la plantation et l'écart ne s'est pas creusé avec le temps. Le même phénomène a été observé dans un essai comparatif entre des plants d'épinette noire 126-25, 67-50 et 45-110; la croissance des plants 126-25 se comparait avantageusement à celle des 67-50 tandis que les plants 45-110 avaient une

croissance significativement plus grandes que les deux premiers (Walsh et al. 2011). Prévost et Dumais (2003) rapportent une croissance en hauteur de +7,1 cm/an pour des plants d'épinette noire 2+0 en 67-50 mais avec une grande fluctuation (3 à 20 cm/an). Ces auteurs concluent que le scarifiage a eu un effet positif marqué sur la croissance en hauteur des plants d'épinette noire reboisés.

On remarque que les courbes de croissance en volume des 67-50 et des 126-25 sont parallèles. Ces résultats démontrent que les mini-plants peuvent s'implanter et croître tout aussi bien que les plants utilisés conventionnellement dans un environnement réputé rigoureux.

Au niveau des concentrations foliaires en minéraux, les deux types de plant se différencient uniquement pour les concentrations en N et Ca. La concentration en N des 126-25 était supérieure à celle des 67-50 ce qui signifie que les racines émergeant de la petites masse des racines de la carotte de 25 cc n'est pas un handicap pour puiser les éléments minéraux du sol. C'est un facteur qui milite en faveur de l'emploi de plants de petites dimensions.

Un plus grand nombre de cavités pour une même surface de récipient permet de produire deux fois plus de semis sur la même surface de culture et doubler la quantité de semis transportés par unité de volume de chargement ce qui influence le coût du reboisement. De plus, le reboiseur a moins souvent besoin de se réapprovisionner en plants ce qui augmente considérablement son rendement. Ces facteurs sont importants dans l'éventualité d'un reboisement des DS où les chemins d'accès sont limités puisque ces aires sont actuellement exclues de l'aménagement forestier. Enfin, la carotte de tourbe plus courte des mini-plants permet de les planter sur des sols très minces où cette opération serait impossible autrement. Les mini-plants sont plus dépendants de l'intensité de la préparation de terrain que les plants conventionnels. Les différences entre les parcelles scarifiées et celles traitées à la taupe ou en plantation directe sont plus grandes pour les plants 126-25

que pour les 67-50. Johansson et al. (2007) ont observé le même phénomène; leur mini-plants de 10 cm s'établissaient plus rapidement et avaient une croissance plus rapide que les semis plus grands uniquement lorsque l'environnement était plus favorable. Cependant, les mini-plants sont plus susceptibles à la compétition et ce facteur milite en faveur d'une préparation de terrain agressive.

PERSPECTIVES

Les résultats de cette étude à long terme valident l'idée de reboiser avec de l'épinette noire des milieux ouverts sur certains types de stations sèches du domaine de la pessière noire à mousses. En effet, les résultats obtenus 10 ans après la plantation de plusieurs sites ouverts répartis en forêt boréale du Saguenay-Lac-St-Jean et dans la région Nord du Québec font état d'un taux de survie suffisant pour assurer une plantation suffisamment dense, ainsi que d'une croissance appréciable lorsque la préparation de terrain est adéquate. Ceci est vrai seulement lorsque le terrain a été scarifié, ce qui pointe vers des mesures agressives de préparation de terrain comme meilleures pratiques sylvicoles à appliquer pour la remise en production des milieux ouverts sur stations sèches. Les résultats de Tremblay (2010) ne montrent pas de différences significatives dans les concentrations foliaires en minéraux des plants reboisés dans les pessières à lichens et ceux de la pessière à mousses. De plus, les plants reboisés sans préparation de terrain avaient des concentrations foliaires en P, Ca et Mg supérieures à ceux reboisés après un scarifiage au TTS ce qui laisse croire que la formation des sentiers de débardage lors de la récolte où les plants ont été reboisés correspondrait à un traitement de labour ou de hersage. Ce fait nous laisse croire que la récolte des tiges des DS avant le scarifiage pourrait augmenter le rendement des plantations via une plus grande perturbation du sol comparativement à un scarifiage sans récolte préalable.

On pourrait pousser plus loin le raisonnement portant sur

l'intensification de la perturbation du sol abordé plus tôt dans le document pour expliquer la meilleure performance des PM.

D'autres études menées sur une partie du dispositif utilisé ici ont déjà permis de constater que les fonctions hydriques des plants croissant dans ces milieux, qui sont des variables critiques pour l'établissement et la croissance des plants, ne diffèrent pas de celles obtenues en pessières à mousse lorsque les terrains sont scarifiés (Hébert et al. 2006). Il faut également envisager d'augmenter le niveau de perturbation du milieu en récoltant préalablement les DS avant de les scarifier ou encore employer des méthodes de préparation de terrain plus agressives que la simple scarification (Prévost 1996, Örlander et al. 1998, Brais 2001). Un suivi opérationnel d'une plantation d'épinette noire reboisés après un scarifiage au Bräcke montre que cette méthode permettrait des gains de croissance importants en forêt boréale (Walsh et Lord 2011). La taupe semble une alternative peu intéressante, contrairement à un traitement dont le niveau de perturbation du microsite est plus élevé comme la double scarification ou l'emploi d'une excavatrice munie d'un peigne, par exemple. Les résultats montrent aussi que l'utilisation de plants issus de récipients 113-25 serait une alternative à considérer dans les DS où la compétition pour la lumière n'est pas un facteur limitant pour la croissance (Girard 2004).

Les résultats des variables de survie et de croissance des plants mis en terre dans les DS démontrent qu'il est possible de reboiser ces territoires avec succès, du moins pour les 10 premières années. De plus, les données de croissance obtenues à l'aide de ce dispositif situé dans des milieux considérés comme improductifs, équivalent à la croissance de certaines plantations «normales» situées dans des territoires de la pessière à mousses qualifiés de productifs. Étant donné leur statut particulier de milieux improductifs et/ou fragiles, les DS ne sont actuellement pas inclus dans les stratégies d'aménagement forestier. Or, nos résultats démontrent que les DS possèdent un potentiel de productivité inexploité qui mérite une attention particulière. Il

faut donc poursuivre la recherche sur ce genre de sites afin de déterminer l'impact de la remise en production de ces milieux en termes de productivité. En plus de contribuer au rendement forestier en tant que tel, la remise en production de ces sites contribuerait au maintien d'un élément essentiel de la diversité biologique en forêt boréale québécoise, soit la forêt fermée d'épinette noire du vaste domaine de la pessière à mousses. Enfin, à l'ère de la problématique des changements climatiques et des gaz à effet de serre, la remise en production de territoires forestiers mal régénérés pourrait représenter une avenue intéressante pour la création de puits de carbone et ainsi permettre au Québec de contribuer encore plus à l'effort mondial nécessaire. Gaboury et al. (2009) estiment le bilan net à 77 t C/ha 70 ans après le reboisement en épinette noire. Dans ce cas particulier il faudra cependant tenir compte de l'effet albédo survenant avec la modification en quelques années d'un espace ouvert fortement couvert de lichens, à un espace de forêt dense.

À plus court terme, il est suggéré de poursuivre le suivi des plantations existantes notamment pour déterminer la croissance à 13 ans qui permettrait une comparaison des rendements avec les données du second mesurage de la mesure des effets réels des plantations suivies par le MRNF. Les mesures de hauteur et DHP à cet âge des arbres dominants permettrait de prédire plus correctement le rendement futur de ces plantations. Enfin, il nous semble impératif d'étudier les variables écologiques permettant d'identifier les stations les plus fertiles.

RÉFÉRENCES

- Baskerville, G.L. 1972. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Can. J. For.* 2: 49-53.
- Bassman, J.H. 1989. Influence of two site preparation treatments on ecophysiology of planted *Picea engelmannii glauca* seedlings. *Can. J. For. Res.* 19: 1359-1370.
- Bedford, L. et Sutton, R.F. 2000. Site preparation for

- establishing lodgepole pine in the sub-boreal spruce zone of interior British Columbia: the Bednesti trial, 10-year results. *For. Ecol. Manage.* 126: 227-238.
- Bernier, P.Y. 1993. Comparing natural and planted black spruce seedlings. *Can. J. For. Res.* 23: 2427-2434.
- Bigras, F.J. et D'Aoust, A.D. 1992. Hardening and dehardening of shoot and roots of containerized black spruce and white spruce seedlings under short and long days. *Can. J. For. Res.* 22: 388-396.
- Boateng, J.O., Heineman, J.L., Bedford, L., Harper, G.J. et Linnell Nemec, A.F. 2009. Long-term effects of site preparation and postplanting vegetation control on *Picea glauca* survival, growth and predicted yield in boreal British Columbia. *Scand. J. For. Res.* 24(2): 11-129.
- Boucher, J.-F., Bernier, P.Y. et Munson, A.D. 2001. Radiation and soil temperature interactions on the growth and physiology of eastern white pine (*Pinus strobus* L.) seedlings. *Plant Soil* 236: 165-174.
- Boucher, J.F., Wetzel, S. et Munson, A.D. 1998. Leaf level response of planted eastern white pine (*Pinus strobus* L.) seven years after intensive silvicultural treatments. *For. Ecol. Manage.* 107: 291-307.
- Bowen, G.D. 1991. Soil temperature, root growth, and plant function. *Dans* Plant roots: The hidden half. Marcel Dekker Inc., New-York: 309-330.
- Bradley, R.L., Fyles, J.W. et Titus, B. 1997. Interactions between *Kalmia* humus quality and chronic low C inputs in controlling microbial and soil nutrient dynamics. *Soil Biol. Biochem.* 29: 1275-1283.
- Brais, S. 2001. Persistence of soil compaction and effects on seedling growth in northwestern Quebec. *Soil Sci. So. Am. Jour.* 65: 1263-1271.
- Brand, D.G. 1990. Growth analysis of responses by planted white pine and white spruce to changes in soil temperature, fertility and brush competition. *For. Ecol. Manage.* 30: 125-138.
- Brodo, I.M., Sharnoff, S.D. et Sharnoff, S. 2001. Lichens of North America. First Edition, Yale University Press. 828 p.
- Côté, D. 2003. Expansion des milieux ouverts à lichens dans le domaine de la pessière à mousses. *Dans* Les enjeux de biodiversité relatifs à la composition forestière. P. Grondin et A. Cimon, coordonnateurs. Ministère des Ressources naturelles de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière et Direction de l'environnement forestier: 175-190.
- Côté, D. 2004. Mise en place des landes forestières dans le domaine des forêts commerciales d'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] BSP.) et potentiel de ces milieux pour la production forestière. Chicoutimi, Québec. Mémoire de maîtrise, UQAC: 107 p.
- Côté, D. et Gagnon, R. 2002. Régression des forêts commerciales d'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] BSP.), à la suite de feux successifs. Actes du colloque : L'aménagement forestier et le feu, Chicoutimi 9 et 10 avril 2002. Ministère des Ressources naturelles, Direction de la conservation des forêts : 162.
- Côté, D., Girard, F., Hébert, F., Bouchard, S., Gagnon, R. et Lord, D. 2012. Is the close-crown boreal forest resilient after successive stand disturbances ? A quantitative demonstration from a case study. *J. Veg.* Sous presse.
- Dancause, A. 2008. Le reboisement au Québec. Les Publications du Québec, Québec. 177 p.
- Draper, D., Binder, W., Fahlman, R. et Spittlehouse, D. 1985. Post-planting ecophysiology of interior spruce. *Dans* Interior spruce seedling performance. Northern Silviculture Committee, British Columbia Ministry of Forests, Research Branch, Victoria, BC. 18 p.
- Forslund, R. R. et Paterson, J.M. 1994. Nondestructive volume estimate of 11-years-old jack pine and black spruce using the power function volum model. *For. Chron.* 70 : 762-767.
- Gaboury, S., Boucher, J.-F., Villeneuve, C., Lord, D. et

- Gagnon, R. 2009. Estimating the net carbon balance of boreal open woodland afforestation: a case-study in Québec's closed-crown boreal forest. *For. Ecol. Manage* 257: 483-494.
- Girard, F. 2004. Remise en production des pessières à lichens de la forêt boréale commerciale : nutrition et croissance de plants d'épinette noire trois ans après traitements de préparation de terrain. Mémoire de maîtrise, UQAC. 56 p.
- Girard, F., Payette, S. et Gagnon, R. 2008. Rapid expansion of lichen woodlands within the close-crown boreal forest zone over the last 50 years caused by stand disturbances in eastern Canada. *J. Biogeography* 35: 529-537.
- Girard, F., Payette, S. et Gagnon, R. 2009. Origin of the lichen-spruce woodland in the closed-crown forest zone of eastern Canada. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 18: 291-303.
- Grossnickle, S.C. 2000. Ecophysiology of northern spruce species: the performance of planted seedlings. NRC Research Press, Ottawa, Ontario, Canada. 409 p.
- Grossnickle, S. C. et Heikurinen, J. 1989. Site preparation: water relations and growth of newly planted jack pine and white spruce. *New For.* 3: 99-123.
- Hébert, F., Boucher, J-F., Bernier, P.Y. et Lord, D. 2006. Growth response and water relations of three-year-old planted black spruce and jack pine seedlings in site prepared lichen woodlands. *For. Ecol. Manage.* 223: 226-236.
- Hines, F.D. et Long, J.N. 1986. First- and second-year survival of containerized Engelmann spruce in relation to initial seedling size. *Can. J. For. Res.* 16: 668-670.
- Hustich, I. 1965. A black spruce feather moss forest in the interior of southern Quebec-Labrador Peninsula. *Acta Geographica*. 18. 25 p.
- Hustich, I. 1966. On the forest-tundra and the forest tree-lines. Reports from the Kevo subarctic Research station. *Ann. Univ. Turku. A* 11. 36: 7-47.
- Ingestad, T. 1973. Mineral nutrient requirement of *Vaccinium vitis idaea* and *V. myrtillus*. *Physiol. Plant.* 29 : 239-246.
- Ingestad, T. 1979. Mineral nutrient requirement of *Pinus silvestris* and *Picea abies* seedlings. *Physiol. Plant.* 45 : 373-380.
- Johansson, K., Nilsson, U. et Allen, H.L. 2007. Interactions between soil scarification and Norway spruce seedling types. *New Forests* 33: 13-27.
- Kirk, R.E. 1982. Experimental design : procedures for the behavioral sciences. Second Edition. Brooks/Cole Publ. Co. Belmont, California. 911 p.
- Landis, T.D., Tinus, R.W., McDonald, S.E., et Barnett, J.P. 1989. The container tree nursery manual – Volume four. Seedling nutrition and irrigation. USDA For. Serv. Agric. Handbook 674. 102 p.
- Lanini W.T. et Radosevich S.R. 1986. Response of three conifer species to site preparation and shrub control. *Forest Sci.* 32: 61-77.
- Lavoie, L. et Sirois, L. 1998. Vegetation changes caused by recent fires in the northern boreal forest of eastern Canada. *J. Veg. Sci.* 9: 483-492.
- Littell, R.C., Milliken, G.A., Stroup, W.W., Wolfinger, R.D., et Schabenberger, O. 2006. SAS® for mixed models, Second Edition. Cary, NC : SAS Institute Inc. 814 p.
- Lord, D., Hébert, F., Boucher, J-F. et Krause, C. 2005. Phase juvenile de croissance et détermination du rendement de plantation d'épinette noire (*Picea mariana* Mill. (B.S.P.)) de la forêt boréale commerciale. Conférence, Association Canadienne-Française pour l'avancement des Sciences (ACFAS), Chicoutimi.
- Lyr, H. et Garbe, V. 1995. Influence of root temperature on growth of *Pinus sylvestris*, *Fagus sylvatica*, *Tilia cordata* and *Quercus robur*. *Trees* 9: 210-213.

- Mallik, A.U. 1993. Ecology of a forest weed of Newfoundland: vegetative regeneration strategy of *Kalmia angustifolia*. Can. J. Bot. 71: 161-166.
- Montgomery, D.C. 1991. Design and analysis of experiments. Third Edition. John Wiley & Sons, New York. 649 p.
- Morneau, C. et Payette, S. 1989. Postfire lichen-spruce woodland recovery at the limit of the boreal forest in northern Quebec. Can. J. Bot. 67: 2770-2782.
- Munson, A.D., Margolis, H.A. et Brand, D.G. 1993. Intensive silvicultural treatment: impacts on soil fertility and planted conifer response. Soil Sci. Soc. Am. J. 57: 246-255.
- Örlander, G., Hallsby, G., Gemmel, P. et Wilhelmsson, C. 1998. Inverting improves establishment of *Pinus contorta* and *Picea abies*-10-year results from a site preparation trial in Northern Sweden. Scand. J. For. Res. 13: 160-168.
- Payette, S., Bhiry, N., Delwaide, A. et Simard, M. 2000. Origin of the lichen woodland at its southern range limit in eastern Canada : The catastrophic impact of insect defoliators and fire on the spruce-moss forest. Can. J. For. Res. 30: 288-305.
- Prégent, G., Bertrand, V. et Charette, L. 1996. Tables préliminaires de rendement pour les plantations d'épinette noire au Québec. Mémoire de recherche forestière no. 118. Gouv. Du Québec, Min. des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. 70 p.
- Prégent, G. et Poliquin, R. 2006. Bilan du second mesurage de la mesures des effets réels des plantations d'épinette blanche, noire, rouge et de Norvège, de mélèze laricin et de pin gris. Rapport interne no. 491. Gouv. Du Québec, Min. des Ressources naturelles et de la Faune, Dir. de la recherche forestière. 53 p.
- Prégent, G. et Végiard, S. 2000. Rendement anticipé des plantations d'épinette noire dans les domaines écologiques de la pessière noire.
- Note de recherche forestière no. 109. Min. des Ressources naturelles, Dir. de la recherche forestière. 12 p.
- Prévost, M. 1996. Effet du scarifiage sur les propriétés du sol et l'ensemencement naturel dans une pessière noire à mousse de la forêt boréale québécoise. Can. J. For. Res. 26: 72-86.
- Prévost, M. et Dumais, D. 2003. Croissance et statut nutritif de marcottes, de semis naturels et de plants d'épinette noire à la suite du scarifiage : résultats de 10 ans. Can. J. For. Res. 33: 2097-2107.
- Quinn, G.P., et Keough, M.J. 2002. Experimental design and data analysis for biologist. Cambridge University Press, Cambridge UK. 537 p.
- Riverin, S. et Gagnon, R. 1996. Dynamique de la régénération d'une pessière à lichens dans la zone de la pessière noire à mousses, nord du Saguenay-Lac-Saint-Jean (Québec). Can. J. For. Res. 26: 1504-1509.
- Saucier, J.-P., Grondin, P., Robitaille, A., Gosselin, J., Morneau, C., Richard, P. J.H., Brisson, J., Sirois, L., Leduc, A., Morin, H., Thiffault, É., Gauthier, S., Lavoie, C. et Payette, S. 2009. Écologie forestière. Dans Manuel de foresterie. Deuxième Édition. Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, Éditions Multimonde, Québec: 165-316.
- Sokal, R.R. et Rohlf, F.J. 1981. Biometry. Second edition. W.H. Freeman and Company, New York. 859 p.
- Thiffault, N., Jobidon, R. et Munson, A.D. 2003. Performance and physiology of large containerized and bare-root spruce seedlings in relation to scarification and competition in Québec (Canada). Ann. For. Sci. 60: 645-655.
- Thiffault, N., Cyr, G., Prégent, G., Jobidon, R. et Charette, L. 2004. Régénération artificielle des pessières noires à éricacées : effets du scarifiage, de la fertilisation et du type de plants après 10 ans. For. Chron. 80: 141-149.

- Thiffault, N., Titus, B.D. et Munson, A.D. 2005. Silvicultural options to promote seedling establishment on *Kalmia-Vaccinium*-dominated sites. *Scan. J. For. Res.* 20:110-121.
- Titus, B.D., Sidhu, S.S. et Mallik, A.U. 1995. A summary of some studies on *Kalmia angustifolia* L.: A problem species in Newfoundland forestry. Information report N-X-296. St-John's NF: Service canadien des forêts, Ressources Canada.
- Tremblay, P. 2010. Remise en production de dénuvés secs à cladonies du domaine de la pessière à mousses du Québec : réponse hâtive des semis d'épinette noire (*Picea mariana* [Mill]). Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi. 57 p.
- Tremblay, P.S. 1996. Manuel de foresterie. Les presses de l'Université Laval, Québec. 1428 p.
- Trottier, F. 1998. Performance des plantations établies par le ministère des Ressources naturelles, dans les forêts publiques du Québec, de 1986 à 1995. Min. des Ressources naturelles, Forêt Québec, Dir. de l'assistance technique. 124 p.
- von Ende, C.N., Scheiner, S.M. et Gurevitch, J. 1993. Repeated-measures analysis: growth and other time-dependent measures. *Dans* Design and analysis of ecological experiments. Chapman & Hall, New York: 113-137.
- Walsh, D., Allaire, J. et Lord, D. 2002. Performance en plantation de plants d'épinette noire de petites dimensions: Rapport d'étape pour la période 2001-2002. UQAC. 26 p.
- Walsh, D., Allaire, J. et Lord, D. 2011. Survie et croissance de mini-plants d'épinette noire reboisés en forêt boréale : Bilan de 10 ans en plantation. <http://dsf.uqac.ca/boreale/>.
- Walsh, D. et Lord D. 2001. Effet du microsite sur la croissance de l'épinette noire plantée après scarifiage au Bräcke ou au TTS – Bilan de 22 ans après la plantation. <http://dsf.uqac.ca/boreale/>.
- Wilk, M.B. et Gnanadesikan, R. 1968. Probability plotting methods for the analysis of data. *Biometrika* 55: 1-17
- Wolfinger, R. et Chang, M. 1995. Comparing the SAS GLM and MIXED procedures for repeated measures. Proceedings of the twentieth annual SAS users group conference, SAS Institute Inc. 11 p.
- Yamasaki S. H., Fyles J. W., Egger K. N. et Titus B. D. 1998. The effect of *Kalmia angustifolia* on the growth, nutrition and ectomycorrhiza symbiont community of black spruce. *For. Ecol. Manage.* 105: 197-207.
- Yamasaki, S.H., Fyles, J.M. et Titus, B.D. 2002. Interaction among *Kalmia angustifolia*, soil characteristics, and the growth and nutrition of black spruce seedlings in two boreal Newfoundland plantations of contrasting fertility. *Can. J. For. Res* 32: 2215-2224.
- Zar, J.H. 1999. Biostatistical analysis. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 929 p.
- Zhu, H. et Mallik, A.U. 1994. Interactions between *Kalmia* and black spruce: Isolation and identification of allelopathic compounds. *J. Chem. Ecol.* 20: 407-421.

